수문생태모형 RHESSys의 평가: 두 복잡지형 유역에서의 모수화와 적용

이보라¹ · 강신규^{1*} · 김은숙² · 황태희³ · 임종환⁴ · 김 준⁵

¹강원대학교 자연과학대학 환경과학과, ²서울대학교 환경대학원 환경계획학과,

³University of North Carolina, USA, ⁴국립산림과학원 산림환경부 산림생태과,

⁵연세대학교 지구환경연구소 대기과학과

(2007년 11월 9일 접수; 2007년 12월 12일 수락)

Evaluation of a Hydro-ecologic Model, RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System): Parameterization and Application at two Complex Terrain Watersheds

Bo-Ra Lee¹, Sinkyu Kang^{1*}, Eunsook Kim², Taehee Hwang³,
Jong-Hwan Lim⁴ and Joon Kim⁵

¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, 200-701 Chuncheon

²Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies,
Seoul National University, 151-742 Seoul

³Department of Geography, University of North Carolina, Saunders Hall, USA

⁴Division of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, 130-712 Seoul

⁵Global Environment Laboratory & Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 120-749 Seoul

(Received November 9, 2007; Accepted December 12, 2007)

ABSTRACT

In this study, we examined the flux of carbon and water using an eco-hydrological model, Regional Hydro-Ecologic Simulation System (RHESSys). Our purposes were to develop a set of parameters optimized for a well-designed experimental watershed (Gwangneung Research Watershed, GN) and then, to test suitability of the parameters for predicting carbon and water fluxes of other watershed with different regimes of climate, topography, and vegetation structure (i.e Gangseonry Watershed in Mt. Jumbong, GS). Field datasets of stream flow, soil water content (SWC), and wood biomass product (WBP) were utilized for model parameterization and validation. After laborious parameterization processes, RHESSys was validated with the field observations from the GN watershed. The parameter set identified at the GN watershed was then applied to the GS watershed in Mt. Jumbong, which resulted in good agreement for SWC but poor predictability for WBP. Our study showed that RHESSys simulated reliable SWC at the GS by adjusting site-specific porosity only. In contrast, vegetation productivity would require more rigorous site-specific parameterization and hence, further study is necessary to identify primary field ecophysiological variables for enhancing model parameterization and application to multiple watersheds.

Key words : RHESSys, Parameterization, Application, Multi-watershed

I. 서 론

생태계 물질순환과정을 모사하는 모형은 연구자들이 직접 측정하기 어려운 생태계의 복잡한 물질순환 과정과 이들의 상호작용 및 변화를 예측하는 도구로서 널리 사용되어왔다. 예를 들어 지구온난화에 따른 전구 혹은 지역규모의 생태계 탄소 흐름을 정량화하거나 (Law *et al.*, 2004), 생육기간의 변화가 생태계 탄소 수지에 미치는 영향을 조사하고 (White *et al.*, 2002), 토지이용변화가 생태계 물질순환과정에 미치는 영향을 평가하며 (Csizsar *et al.*, 2004), 산불에 따른 생태계 일차생산성과 증발산의 변화 (Kang *et al.*, 2006a) 및 질소순환과정에 미치는 영향을 평가 (Ojima *et al.*, 1994)하는 등 모형을 이용한 다양한 생태계 수준의 연구가 수행되었다. 생태계물질순환 모형은 광합성, 호흡, 탄소 및 질소순환, 지표 에너지수지 및 물 순환 등을 포함하는 생태계의 다양한 생지화학적 과정들을 모사하는 관계로 흔히 생태계 생지화학 (ecosystem biogeochemistry) 모형이라 부른다. BIOMASS (McMurtrie *et al.*, 1990), BIOME-BGC (Running and Coughlan, 1988), CENTURY (Parton *et al.*, 1988), PnET (Aber and Federer, 1992), RHESSys (Band *et al.*, 1996), 3PG (Landsberg and Waring, 1997) 등의 세계적으로 인정 받는 모형들이 개발되어 생태계 수준의 연구에 널리 사용되고 있다. 반면에, 국내의 생태계 생지화학 모형연구는 아직 미진한 편이지만 지난 수년 간 서서히 그 활용도가 증가해왔다. 최근에 Eum *et al.* (2005)과 Kang *et al.* (2006b)이 BIOME-BGC를 경기도 광릉시험림 유역과 강원도 점봉산에 적용하여 모수화를 진행하고 예측력을 평가한 후, 일차생산성과 기상인자들 간의 관계를 분석하였다.

지역 생태수문 모사시스템인 RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System)는 생태계 생지화학모형의 일종이지만 유역수문과정과 생태계 물질순환과정을 통합적으로 모사하는 점에서 타 생지화학 모형과 차별성을 가진다. RHESSys는 지리정보시스템 (GIS)을 바탕으로 3차원 공간에서의 탄소와 물 그리고 영양염의 흐름을 모사한다 (Tague and Band, 2004). 다른 수문모형과 마찬가지로 강우, 증발 그리고 유출량 자료로부터 유역 안에서의 수평적인 흐름과 토양 단면에 따른 수직적 물의 흐름을 모사한다. 그러나 수문과정과 식생성장 간의 상호작용을 고려하는 부분에

서 타 수문모형과 차별성을 가진다. 특히 유역 내의 토양수분 분포는 식생다양성, 일차생산성, 토양 생지화학적 과정의 공간적 이질성에 영향을 주며, 이들 생태학적 구조와 기능은 결국 임관의 강수 차단량과 유역의 유출수량과 수질을 결정하는 되먹임작용을 한다. 따라서 복잡지세의 산림유역이 발달한 한국의 산악경관에는 유역 안에서의 물의 거동과 탄소 및 질소 등의 생지화학적 과정을 함께 모사하는 능력을 가진 RHESSys와 같은 생태수문모형을 사용하는 것이 개념적으로 적절하다.

지난 십 여 년간 RHESSys는 지속적으로 개발되어 여러 유역의 생태계 과정을 모사하는 데에 적용되었다 (Baron *et al.*, 1998; Meentemeyer *et al.*, 2001). Band *et al.* (1996)은 캐나다 온타리오주 중앙에 위치한 복잡 산악 지형에서 기후변화에 따른 증발산량, 순광합성량, 유출량 등을 추정하였다. Meentemeyer *et al.* (2001)은 캘리포니아 관목수풀지대에서 미세지형의 환경요인이 식생의 생물리학적 과정에 어떤 영향을 주는지를 조사하기 위해 RHESSys를 이용하였다. 또한 Zierl *et al.* (2007)은 유럽 알프스 산맥의 여러 소유역에 RHESSys를 적용한 결과 실측 자료와 비교하여 의미 있는 유출량, 적설량, 실제 증발산량의 예측이 가능함을 보였다. 국내의 연구사례로 Kim *et al.* (2007)과 Hwang *et al.* (2007)은 RHESSys를 광릉시험림유역에 적용하여 유출량, 토양수분, 증발산 및 순생태계 이산화탄소 교환량 (net ecosystem exchange of CO₂) 측정자료와 상호비교를 수행하여 유역 유출수량과 토양수분 공간분포의 예측가능성 및 plot 규모의 연구를 인공위성을 활용한 광역규모의 연구로 확장하는 중간 연결자로서 RHESSys의 활용성을 확인하였다.

탄소와 물의 흐름을 정량적으로 예측하는 것은 탄소수지 연구와 수자원의 이용과 관리 등에 매우 중요하다. 또한 여러 소유역을 포함하는 중대규모 유역에 대한 생태계과정을 모사함으로써 지역규모의 탄소수지와 수량 및 수질을 예측하는 기법에 대한 환경적, 경제적, 정책적 요구가 증대하고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 국내의 생태수문 모델링연구는 아직 시작단계로서 상대적으로 생태수문자료가 폭넓게 축적되어 온 광릉시험림유역 등 단일 소유역을 대상으로 적용되었으며, 중대유역단위의 적용사례는 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 RHESSys를 중대유역으로 확장하기 위한 기초연구로서, 기후, 지형, 및 식생구조가 서로 상

이한 두 소유역에 RHESSys를 적용 및 평가함으로써 RHESSys의 다중소유역 확장가능성과 문제점을 평가하였다. 이를 위해 실측자료가 비교적 풍부한 광릉시험림 유역에서 모형을 모수화한 후, 강원도 점봉산 강선리 유역에 모형을 적용하였고 그 예측력을 한정된 실측자료를 바탕으로 평가하였다. 다유역에 동일모수화를 적용하였을 때의 예측력을 분석함으로써 향후 중대유역으로의 확장시 RHESSys의 모수화 방안과 한계점을 제안하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구지역

본 연구의 대상유역은 경기도 포천시 소흘읍에 위치한 광릉시험림 유역 (N37° 45', E127° 9', Fig. 1a)과 강원도 인제군 강선리에 위치한 점봉산 강선리 유역 (N38° 02', E128° 26', Fig. 1b)이다. 광릉시험림 유역의 면적은 약 2.2 km², 해발고도는 90~530 m이다. 우점종은 졸참나무(*Quercus serrata*), 당단풍(*Acer pseudo-sieboldianum*), 까치박달(*Carpinus cordata*), 서어나무(*Carpinus laxiflora*) 등이다. 수령은 60~400년이고 수고는 18~20 m이다(Oh *et al.*, 2000). 연평균 기온은

11.3°C이고 연평균 강수량은 1,482 mm이다. 점봉산 강선리 유역의 면적은 약 7.5 km²이며 해발고도 700~1,425 m이다. 우점종은 신갈나무(*Quercus mongolica*), 당단풍(*Acer pseudo-sieboldianum*), 피나무(*Tilia amurensis*) 등이다. 수령은 30~270년이고(Go, 1999), 수고는 광릉시험림 유역과 비슷한 15~20 m, 연평균 기온과 강수량은 5.9°C와 1,958 mm이다.

2.2. RHESSys 생태수문모형

RHESSys는 생태계 생지화확모형인 BIOME-BGC와 유역수문모형인 TOPMODEL, 그리고 산악 미기상모형인 MTCLIM이 결합된 군집(community) 모형이다(Tague and Band, 2004). 수문과정을 모사하는 TOPMODEL은 지형 지수와 토양 수평전달계수를 사용하여 유역 내 각 격자의 표면유출과 지표면하유출의 기여면적을 계산한다. RHESSys는 임상도, 토양도, 지형도 등의 GIS 공간자료를 바탕으로 환경적으로 균일한 속성을 가진 모형구동의 최소단위를 설정한다(Zierl *et al.*, 2007). 모형은 Basin, Hillslope, Zone, Patch, Strata 등의 위계적 공간구조를 가진다. 여기서 Basin은 전체 유역, Hillslope는 Basin 내의 소유역, Zone은 Hillslope 내에서 미세지형에 의해 결정되는 동일

Fig. 1. Location of study sites: a) Gangseonry watershed in Mt. Jumbong (GS) and b) Gwangneung Research Watershed (GN).

한 미기후 영역, Patch는 Zone 내에서 탄소 및 질소 등 토양물질순환의 최소단위, Strata는 각 Patch 내에서 식생유형에 따른 식생물질순환의 최소단위이다(Tague and Band, 2004; Zierl *et al.*, 2007). RHESSys는 생지화학적 과정과 수문과정의 구동인자로서 일 단위 기상자료를 입력자료로 사용하여, 유출량, 토양수분, 증발산과 같은 수문과정과 임목생장량, 순일차생산량, 토양호흡, 엽면적 지수 등 생지화학적 과정에 대한 일 단위 변화를 예측한다.

본 연구에서는 Hwang *et al.*(2007)에 의해 수정된 RHESSys 5.10.8 버전을 사용하였다. Hwang *et al.* (2007)은 토양층을 포화층 및 불포화층으로만 구분하는 기존의 RHESSys 모형의 경우, 지하수면이 깊을 때 근권의 토양수분변화를 정확히 묘사하지 못함을 지적하였고, 이를 보완하기 위해 근권층을 새로이 삽입하였다. 또한 기존의 RHESSys는 식생이 불포화층 전체의 수분을 이용할 수 있도록 되어있는데, 이 경우 지하수면이 깊으면 식물 뿌리가 깊은 곳의 물을 흡수하기 위해 받는 수분 스트레스를 묘사하기가 어렵다. 따라서 근권층을 삽입함으로써 지하수면이 근권 아래 위치할 경우 불포화층을 근권층과 교환층으로 구분하게 되었고, 식물은 근권층의 토양수를 이용하도록 묘사하였다.

2.3. 모형입력자료

2.3.1. 기상자료

모형구동을 위해 광릉시험림 유역과 점봉산 강선리 유역의 일 단위 최고 및 최저기온, 강수량 자료를 준비하였다. 광릉시험림 유역의 경우 Kim *et al.* (2007)에서 사용한 1982-2005년 간의 일 단위 기상자료를 사용하였다. 점봉산 강선리 유역의 경우 Kang *et al.*(2006b)의 방법과 같이 유역 내의 AWS 관측자료와 인근 기상대의 관측자료 간에 회귀식을 개발함으로써 나이트 자료에 시작하는 1978부터 2006년까지의 일 단위 기상자료를 제작하였다. 1999년 강선리 유역의 AWS 관측자료와 비교한 결과 기온의 경우 인제 기상대(최고기온 $r^2=0.89$, 최저기온 $r^2=0.92$), 강수량의 경우 속초기상대($r^2=0.84$)가 각각 가장 높은 결정계수를 보였다.

2.3.2. GIS 자료

광릉시험림 유역은 국립지리정보원의 1:5000 수치지

형도로부터 30 m 격자의 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM)을, 점봉산 강선리 유역은 1:25,000 수치지형도로부터 60 m 격자의 DEM을 만들었다(Fig. 2). ArcInfo GIS 소프트웨어를 이용하여 DEM으로부터 경사도와 사향도를 제작하였고, 아래의 식 1을 이용하여 기여면적에 따라 물의 흐름을 묘사하는 지형습윤지수(Topographical Wetness Index) 지도를 제작하였다.

$$W_{index} = \ln \frac{a}{\tan \beta} \quad (1)$$

$$a = \frac{A}{L} \quad (2)$$

여기서 W_{index} 는 습윤지수, a 는 단위 등고선 길이에 대한 수분기여면적, β 는 경사도, A 는 해당 격자에 기여하는 전체면적, L 은 흐름이 발생하는 방향의 등고선의 길이이다. A 는 ArcInfo에 의해 계산된 누적흐름 격자수를 이용하였다.

광릉시험림 유역의 식생지도는 Landsat ETM+ 위성영상을 이용하여 낙엽활엽수 및 상록침엽수로 구분

Fig. 2. GIS input data: a) the GN and b) the GS.

한 30 m 해상도의 식생지도를 사용하였고(Hwang *et al.*, 2007), 점봉산 강선리 유역은 대부분 활엽수가 우점한 지역이므로 낙엽활엽수림으로 가정하였다.

2.4. 현장조사자료

RHESSys 예측값의 신뢰도를 평가하기 위한 현장조사자료로서 광릉시험림 유역의 경우 일 단위 유량과 토양수분 그리고 연 단위 임목재적생산량(Wood Biomass Product, WBP)과 최대 엽면적 지수를, 점봉산 강선리 유역의 경우 일 단위 토양수분과 연 단위 임목재적생산량 및 엽면적 지수를 각각 사용하였다. 유량자료는 Jung *et al.*(2002)이 광릉시험림 유역의 상류 소유역(약 0.22 km²)에서 측정한 1982년부터 1999년까지의 일 단위 유량자료를 사용하였다.

WBP는 두 조사지역에서 수행한 나이트 자료와 Lim(1998)의 단목방적식(식 3)을 이용하여 추정하였다. 나이트로부터 추정한 각 연륜의 흉고직경(D)을 식 3에 입력하여 임목생체량(B)을 추정하였고, 임목생체량의 연간 차이를 계산하여 WBP를 추정하였다.

$$B = \alpha D^{\beta} \quad (3)$$

위 식에서 α 와 β 는 회귀계수이다.

광릉시험림 유역의 경우 위의 방법에 따라 Kim(2006)이 보고한 1991-2004년까지의 WBP 자료를 사용하였다. Kim(2006)은 10개 plot에 대한 WBP 추정결과 광릉시험림 유역의 WBP가 1991년에서 2004년까지 188.7에서 304.7 gCm⁻²y⁻¹까지의 연변화를 보였고 연평균 WBP는 271.4 gCm⁻²y⁻¹ 임을 보고하였다. 점봉산 강선리 유역의 WBP는 Go(1999)가 수행한 나이트자료를 사용하여 역시 위와 같은 Lim(1998)의 방법에 따라 추정하였다. 점봉산 강선리 유역의 WBP 추정결과 1978년에서 1997년까지 282.2에서 405.7 gCm⁻²y⁻¹까지의 연변화를 보였으며 연평균 WBP는 347.7 gCm⁻²y⁻¹ 이었다.

토양수분은 두 조사유역에 설치한 Time Domain Reflectometry(TDR)센서로 측정하였다. 본 연구에 사용한 토양수분자료는 광릉시험림 유역의 경우 플렉스타워 인근에 측정한 2002년 자료를, 강선리 유역은 AWS 설치지점에서 측정한 2005년 토양수분자료를 사용하였다. 양 지역 모두 지면으로부터 0-0.3 m 사이의 시간 단위로 측정한 토양수분을 일단위로 평균한 후 모형 예측값과 비교하였다.

연간 최대엽면적 지수는 LI-COR 2000 엽면적 지수 측정기를 사용하여 간접적으로 측정하였다. 광릉시험림 유역의 경우 Kim(2006)이 2005년에 플렉스타워 인근에서 측정한 4.98을 사용하였고, 강선리 유역의 경우엔 2005년에 고도에 따라 4곳에서 측정한 최대엽면적지수 5.58을 모형의 예측값과 비교하였다.

2.5. RHESSys의 모수화 및 평가

RHESSys 구동을 위해선 식생과 토양의 탄소, 질소, 수분함량에 대한 초기값이 필요하다. 그러나 실측에 근거하여 모든 초기값을 결정하기가 어렵기 때문에 RHESSys에서는 생태계의 탄소 흡수가 안정화될 때 모형의 초기값을 결정하는 기능을 제공하는데, 이를 선회증가(spin-up)이라 한다. 본 연구에서 선회증가에 의해 모형을 초기화하였고, 안정화에 소요된 기간은 두 대상지역 모두 200년이였다. 초기화된 RHESSys를 광릉시험림 유역의 경우 1982에서 2005년까지, 강선리유역은 1978에서 2006년까지 구동한 후, 각 연구지역의 현장조사자료와 비교하였다. 본 연구 목적에 따라 광릉시험림 유역의 자료로 모형의 모수화를 진행하였고, 이들 모수를 강선리유역에 적용하여 그 결과를 평가하였다. 한편 토양물리특성과 기상자료는 각 연구지의 자료를 사용하였다. 토성(sand:silt:clay)은 광릉유역의 경우 55:28:17, 강선리 유역의 경우 64:27:9를 사용하였고, 공극률은 각각 0.48과 0.53의 실측값을 사용하였다(Kang *et al.*, 2006; Hwang *et al.*, 2007; Table 1).

Kim *et al.*(2007)은 RHESSys 모형의 수직 및 수

Table 1. Values of soil parameters used in RHESSys modeling at the Gwangneung research watershed (GN) and the Gangseonry watershed in Mt. Jumbong (GS)

Values		Parameters	Reference
0.48	GN	Porosity	Measured
0.53	GS		
0.204		pore_size_index	Dingman (1994)
0.218		psi_air_entry	Dingman (1994)
55	GN	sand(%)	Measured
64	GS		
28	GN	clay(%)	Measured
27	GS		
17	GN	silt(%)	Measured
9	GS		

Table 2. Values of eco-physiological parameters used in RHESSys modeling

Values	Parameters	Reference	Values	Parameters	Reference
30.8	proj_sla	Measured in GN (E. Kim)	0.88	PLNR	
0.002	kfrag_base	From Biome-BGC	-0.34	psi_open	
51	froot_cn	Measured in GN	-2.2	epc.psi_close	
100	day_leafon	Measured in GN	900	epc.vpd_open	
275	day_leafoff	Measured in GN	2500	epc.vpd_close	
50	ndays_expand	Measured in GN	0.006	epc.gl_smax	
40	ndays_litfall	Measured in GN	0.00006	epc.gl_c	
22.11	leaf_cn	Measured in GN	2.0	lai_ratio	
56.6	leafltr_cn	Measured in GN	1.0	leaf_turnover	White <i>et al.</i> (2000)
1.0	proj_swa	Waring and Running (1998)	0.7	livewood_turnover	
1.8	alloc_stemc_leafc	calibration	50	livewood_cn	
0.4	alloc_livewoodc_woodc	calibration	0.38	leafltr_flab	
0.77	deadwood_fccl		0.44	leafltr_fccl	
0.23	deadwood_flg		0.18	leafltr_flg	
1.20	alloc_frootc_leafc	White <i>et al.</i> (2000)	0.34	frootltr_flab	
0.22	alloc_crootc_stem		0.44	frootltr_fccl	
0.2	alloc_prop_day_growth		0.22	frootltr_flg	

평방향 물 흐름에 관여하는 6개 주요 모수에 대한 모수화 결과를 제시하였다. 각 모수의 민감도를 평가한 결과 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity, K_{sat})의 값에 따른 감소율을 결정하는 m 의 배수인 $sen1$ 이 가장 큰 민감도를 보이며 기저유출량에 영향을 미쳤다. 본 연구에서는 $sen1$ 과 함께 기저유출량에 영향을 주는 또 다른 모수인, K_{sat} 의 배수인 $sen2$ 를 모수화 대상으로 하였고, 다른 모수들은 Kim *et al.*(2007)과 동일하게 사용하였다. 광릉시험림 유역에 대해 1982에서 1999년간의 일단위 유출량 실측값을 사용하여 $sen1$ 과 $sen2$ 를 모수화하였다. 모수화의 범위는 Tague and Band(2004)에서 제시한 바에 따라 $sen1$ 은 0.01에서 100까지, $sen2$ 는 1에서 100까지 설정하여 Monte-Carlo법에 따라 모형을 1000번 실행한 후 최적의 모수값을 결정하였다. 각 모수의 최적값은 Zierl *et al.*(2007)의 방법에 따라 Nash-Sutcliffe modeling efficiency coefficient (ME)를 이용해 결정하였다.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (Si - \bar{O})^2} \quad (4)$$

여기서 S_i 는 RHESSys의 예측값, O_i 는 실측값, $\bar{O}$ 는 실측 평균값이다.

식생성장예 영향을 미치는 모수 중에서 건중량단위 엽면적(Specific Leaf Area, SLA)과 잎의 탄질비(C:N ratio)는 현장측정값을 사용하였다(Kim *et al.*, 2007, Table 2). 본 연구에서는 엽내 루비스코의 질소 함량(Percent of Leaf Nitrogen in Rubisco, PLNR)과 광합성 산물의 분배계수인 $f1$, $f2$, $f3$, $f4$ 등을 모수화하였다. $f1$ 은 잔뿌리와 잎 간의 분배비율이고, $f2$ 는 굵은 뿌리와 줄기간의 분배비율, $f3$ 는 줄기와 잎간의 분배비율, $f4$ 는 살아있는 목부와 전체 목부 간의 탄소분배비율이다. 예비 모수화를 수행한 결과 PLNR은 White *et al.*(2000)이 제시한 값에서 최적의 결과를 보였으며, 분배계수 중 $f3$ 과 $f4$ 가 $f1$ 과 $f2$ 에 비해 민감도가 높게 나타났다. 따라서 $f3$ 과 $f4$ 에 대해서만 집중적인 모수화를 진행하였고, PLNR과 $f1$, $f2$ 는 White *et al.*(2000)이 제시한 값을 사용하였다. Table 3과 같이 White *et al.*(2000)이 제시한 범위 내에서 $f3$ 과 $f4$ 를 단계적으로 변화시킨 후, WBP 예측값과 실측값 간의 오차가 최소가 되는 $f3$, $f4$ 값을 결정하였다. 오차통계량으로 2차제곱근오차(Root mean square error, RMSE)(식 5)와 평균편향오차(Mean bias error, MBE)(식 6)를 사용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Si - Oi)^2}{N}} \quad (5)$$

Fig. 3. Daily streamflow and daily rainfall: a) Daily streamflow at the GN from 1982 to 1999 and simulated daily streamflow from RHESSys; b) Daily rainfall at the same period at the GN.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{N} \quad (6)$$

일단위 유출량과 WBP에 대해 위의 모수화 과정을 수행 한 후, 모수화에 사용하지 않은 토양수분자료를 이용해 RHESSys 모형의 예측력을 평가하였다. RHESSys에서는 토양수분을 직접 예측하지 않기 때문에, 모형에서 예측하는 근권(root zone)의 물함량을 근권 깊이로 나누어서 토양수분(%)을 간접적으로 추정 한 후 실측값과 비교하였다(식 7). 근권 깊이는 광릉 플럭스 타워 인근의 관측값인 0.75 m를 사용하였다. 측정지점과 모형예측지점과의 일치치를 위해 광릉시험림 유역과 강선리 유역의 토양수분측정지점에 해당하는 지역의 모형예측값만을 추출하여 사용하였다.

$$\begin{aligned} &\text{Soil Water Content (SWC in \% volume)} \\ &= \frac{\text{root zone storage}}{\text{root depth}} \end{aligned} \quad (7)$$

III. 결 과

3.1. 모수화 및 예측력 평가

일 단위 유출량의 관측값과 RHESSys 예측값을 비교한 결과 sen1은 0.57, sen2는 9.80에서 가장 높은

ME(=0.79)를 보였다. 이는 Kim *et al.*(2007)의 결과 (sen1 = 0.80; sen2 = 1.00; ME = 0.75)와 차이가 있으나, 모형의 예측력은 보다 향상되었다. 이러한 차이의 일부는 연구에 사용한 RHESSys 버전의 차이와 Hwang *et al.*(2007)에 의한 근권층의 삼입효과에 기 인하는 것으로 보인다. 본 연구에서 결정한 sen1, sen2 값을 이용한 결과 실측 및 예측 유출량 간에 Fig. 5와 같은 분포를 보였으며, 상관계수는 0.89로 예측유출량은 실측유출량과 비교하여 유의미한 상관성 을 보였다($p=0.01$).

그러나 Kim *et al.*(2007)이 보고한 바와 같이 약한 단기 강우에 의해 유출량이 소량 증가하는 날에 대해 예측력이 높지 않았다. 또한 1990년 여름에 유출량이 강수량보다 높은 경향이 관측되었는데 이를 세밀히 모 사하지 못하였다. 이들 모형예측의 한계에는 여러 이 유가 있겠으나, 전자의 경우엔 모형에서 예측하는 임 관에 의한 강수차단량을 보다 면밀히 조사할 필요가 있으며, 후자는 모형예측과 실측 간의 시간규모의 차 이에 일정 부분 관여할 것으로 사료된다. 즉 RHESSys 의 일 단위 수문과정모사가 장기강우 혹은 선행강우가 잦은 경우에도 효과적인지를 평가할 필요가 있다. 아 울러 본 연구에서 수행한 제한적인 모수화 과정 역시 모형의 예측력에 영향을 주었을 것이다.

f3과 f4 모수화 범위에서 WBP는 각각 -16~20%과

Fig. 4. Parameterization results at the carbon allocation parameters, f_3 , f_4 . We selected the point (symbol:+) with the minimum average of RMSE, percent RMSE, MB, percent MB.

Table 3. Parameterization of carbon allocation parameters. Statistical criteria for comparison of observed and simulated wood biomass product (WBP, $\text{gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$) and Leaf area index (LAI) at the GN.

Parameter (range)	Value	RMSE (gCm^{-2})	%RMSE	MBE (gCm^{-2})	%MBE	Observed		Simulated	
						Mean WBP	Max LAI	Mean WBP	Max LAI
f_3 (0.8-5.28)	1.8	0.024	8.84	0	-0.17	270.39	4.98	250.01	4.56
f_4 (0.096-0.6)	0.4								

-27~8%의 변화를 보였다. 임목의 탄소분배비율 f_3 , f_4 의 모수화 결과, f_3 은 1.8 그리고 f_4 는 0.4에서 가장 낮은 RMSE(=0.024 gCm^{-2})와 MBE(=0.0 gCm^{-2})를 보였다(Fig. 4). 이 때 실측값에 대한 백분율 RMSE와 MBE는 각각 8.84%와 -0.17%였고, RHESSys가 예측한 최대 LAI 값은 실측 최대 LAI 값(=4.98)과 유사한 값(=4.56)을 보였다(Table 3).

1991년부터 2004년까지 광릉시험림 지역의 WBP 연변화 경향에서 2001년의 WBP가 다른 해에 비해 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다. Kim(2006)은 이

러한 WBP의 급격한 감소를 2001년 봄의 건조한 기후와 연관하여 설명하였다. 본 연구에서 결정된 f_3 과 f_4 를 사용하여 모형을 구동시킨 결과, 광릉시험림 지역에서 추정된 WBP 변화경향과 유사하게 RHESSys의 2001년 WBP도 급격히 감소하였고, 절대값 역시 상당히 유사하게 묘사하였다(Fig. 5).

광릉시험림 지역의 광릉 플럭스 타워 부근에 설치된 TDR센서의 일 단위 토양수분 값과 RHESSys의 일 단위 토양수분 예측값을 비교해 본 결과, 상관관계수는 0.80으로 실측값과 예측값 사이에 유의한 상관관계를

Fig. 5. Observed wood biomass product (WBP) and simulated WBP at the GN. WBP measured by tree-ring data from 1991 to 2004 and simulated WBP from RHESSys.

보였다($p < 0.001$; Fig. 6a). 그러나 RHESSys의 예측 값이 전체적으로 과소평가되고 있음을 볼 수 있다. 특히 실측 토양수분이 30% 이상으로 올라가도 모형의 결과는 그에 미치지 못하고 있어 모형이 실측값의 최고치를 예측하는 측면에서 아직 미흡함을 나타냈다 (Fig. 6a).

3.2. 점봉산 강선리 유역에의 적용

광릉시험림 유역에서 모수화된 주요 생물리학적 모수들, $sen1$, $sen2$, $f3$, $f4$ 를 점봉산 강선리 유역의 RHESSys 모사에 적용시켰다. 1978년부터 2005년까지 모형을 구동시킨 후 점봉산 강선리 유역의 TDR센서에 의해 측정된 2005년 토양수분과 RHESSys의 예측 토양수분을 비교하였다(Fig. 6b). 광릉시험림 유역과 같은 값의 공극률($=0.48$)을 사용했을 때 상관계수는 0.91로 실측값과 예측값은 높은 상관관계를 보였으나 ($p < 0.001$), 전반적으로 실측토양수분을 과소평가하였다. 한편, 점봉산 강선리 유역의 토양은 유기물층이 비교적 깊고 용적밀도(bulk density)가 낮아 상대적으로 높은 공극률을 가진다(Kang *et al.*, 2003). 따라서 Kang *et al.*(2003)이 제안한 강선리 유역의 공극률($=0.53$)을 사용하여 다시 모형을 수행한 결과, 광릉시험림 유역의 공극률인 0.48을 사용했을 경우와 비교하여 개선된 예측값을 보였다($R=0.94$, $p < 0.001$; Fig. 6b).

1978년부터 1997년까지 RHESSys의 WBP 연변화 예측값과 강선리 유역에서 추정된 WBP와 비교해 보면 예측 WBP가 실측 WBP와 유사하게 점점 감소하

Fig. 6. Observed soil water content (SWC) and simulated SWC: a) SWC measured by TDR (2002) at the GN Flux Tower and simulated soil water content from RHESSys at the same period. Simulated SWC, SWC_sim(a) is the value of one certain cell, whereas SWC_sim(b) is the value of 9 contiguous cells around a certain point, and b) SWC measured by TDR (2005) at the GS and simulated SWC from RHESSys at the same period. The porosity of SWC_sim(a) is 0.48 which is the value of GN and that of SWC_sim(b) is 0.53, an average value of 9 contiguous cells.

Fig. 7. Measured wood biomass product (WBP) and simulated WBP at the GS. WBP measured by tree-ring data from 1978 to 1999 and simulated WBP from RHESSys.

는 경향을 보이고 있다. 그러나 연 변화량에 대한 모시는 유의한 상관성을 보이지 않았으며, 또한 실측값에 비해 약 28% 정도 과소평가하는 결과를 보였다. 광릉시험림 유역에서의 WBP 예측과 달리 강선리 유역에서는 WBP의 변화를 잘 모사하지 못하였다(Fig. 7).

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 광릉시험림 유역에서 실측된 일 유출량과 WBP를 RHESys 모형의 예측결과와 비교하여 모수화를 진행하였고 유출량과 토양수분 자료를 이용하여 모수화된 모형의 예측력을 평가하였다. 또한 광릉시험림에서 모수화한 모형을 서로 다른 지형 및 임분 특성을 가진 점봉산 강선리 유역에 적용시켰다. 광릉시험림 유역에서의 실측 일 유출량과 모형의 일 유출량을 비교하여 ME를 기준으로 최적의 수문 과정 주요 모수들을 결정하였고($sen1=0.574$, $sen2=9.8$; $ME=0.79$), 실측 WBP와 모형의 WBP를 비교하여 최적의 임목생장 및 광합성 산물 분배 관련 모수들을 결정하였다($f3=1.8$, $f4=0.4$; $RMSE=0.024 \text{ gCm}^{-2}$, $MBE=0.0 \text{ gCm}^{-2}$). 광릉시험림 유역에서 측정한 토양수분과 RHESys의 토양수분을 비교하여 모수화 결과를 평가해 본 결과 유의미한 상관관계를 보였다($R=0.80$, $p<0.001$). 강선리 유역 역시 토양수분에 대해 높은 예측력을 보였고 ($R=0.94$, $p<0.001$), 이 때 공극률과 토성은 강선리 유역에서 측정된 값을 사용하였다. 그러나 광릉시험림 유역과 동일 모수 사용시 RHESys의 예측 WBP는 강선리 유역의 실측 WBP와 비교하여 그 예측력이 높지 않았다.

광릉시험림 유역에서의 모형의 일 단위 토양수분은 실측값보다 최대 30%까지 과소평가하였다. 또한 RHESys는 실측 토양수분의 일간 변화량을 과소평가하였는데, RHESys의 일단위 수문계산과정이 일부 영향을 미친 것으로 보여진다. RHESys의 일단위 수문과정에서는 침투, 증산, 발산 및 유출 과정들이 발생한 후에 물이 근권에 저장된다. 즉 일단위의 식생 수문순환 과정들의 하루의 끝에서 토양층으로의 물의 분배가 발생하기 때문에 예측되는 토양수분이 실측값보다 과소평가되거나 그 일간 변화량이 감소할 수 있다. 그러나 RHESys는 잦은 강수로 인해 일토양수분의 변화가 큰 여름철의 토양수분 경향을 의미있게 모사해 주었다. 특히, 강선리 유역에 적용시 단지 실측

공극률(0.53)과 토양입도분포(soil texture)만을 반영하였음에도 불구하고, 상대오차가 평균 -3.5%에 불과하였고, 매우 유사한 토양수분 시계열 변화를 모사할 수 있었다($R=0.94$, $p<0.001$). 물론 향후 여러 소유역에 대해 보다 광범위한 평가를 수행할 필요가 있으나, 본 연구결과 RHESys는 공극률 및 토양입도분포 등 몇 가지 주요한 토양물리적 특성만을 고려함으로써 상이한 지역의 토양수분변화를 의미 있게 모사할 수 있음을 보여주었다.

광릉시험림 유역의 임목생장과 광합성 산물 분배에 관련된 모수화 과정에서 가장 낮은 RMSE와 MBE 값을 가진 최적의 모수값으로 모형을 수행한 결과, 실측한 WBP와 비교하여 예측 WBP는 2001년에 크게 감소하는 경향을 뚜렷이 모사하면서 의미있는 상관관계($R=0.60$, $p=0.28$)를 보였다. 반면에 강선리 유역에서 실측한 WBP와 모형의 예측 WBP를 비교했을 때는 그 연간 변화를 제대로 모사하지 못하였다($R=0.06$, $p<0.001$). 그 원인으로 입력 기상자료의 불확실성, 식생관련 현장실측자료의 부족과 강선리 유역의 식생특성을 반영하는 모수화의 필요성 등을 거론할 수 있다.

점봉산 강선리 유역에서 사용된 입력 기상자료의 경우, 1999년 이전의 강선리 유역에서 측정되는 기상자료가 없어 인근 기상대인 인제 기상대(기온자료)와 속초 기상대(강수량자료) 자료를 사용하여 강선리 기상자료를 구축하였다. 그러나 이들 인근 기상대의 기상자료로부터 점봉산 강선리 유역의 산악 기상을 구현하는 데에는 한계가 있어 입력기상자료의 불확실성이 모형 결과에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

또한 강선리 유역에서는 광릉시험림 유역에 비하여 현장 실측자료가 부족하므로 강선리 유역의 식생 특성을 반영하는 생물리학적, 생화학적 현장 실측자료의 입력이 부족한 점도 강선리 유역의 임목생장 및 분배 과정을 제대로 모사하지 못한 원인이 될 수 있다. 일례로 광릉연구지에 비해 SLA와 잎의 탄질비 등 조사이식생의 특성을 제대로 반영하지 못하였다. 정확한 입력 기상자료의 구축과 유역의 특성을 반영하는 현장 실측자료의 측정은 모형의 예측력 향상에 있어 반드시 필요한 부분이다. 향후 여러 식생관련 입력정보 중에서 민감도가 큰 변수를 구분함으로써 모형신뢰도 향상을 위한 필수 현장 측정 항목을 제한할 필요가 있다.

강선리 유역과 광릉시험림 유역은 서로 다른 식생과

기후 조건으로 인해 f3, f4 등과 같은 식생성장 및 광합성 산물 분배에 관련된 생리학적 모수들이 서로 다른 특성을 가질 수 있으나, 본 연구에서는 광릉시험림 유역과 동일한 생리학적 모수들을 적용하여 평가하였다. 본 연구의 실측 및 예측 WBP 결과에 따르면, 단일 유역의 임목성장 및 분배 특성을 반영한 모수들을 서로 다른 특성을 가지는 다른 유역에 그대로 적용했을 때 불확실한 예측력을 보였다(Fig. 7). 이들 분배계수들은 실측이 매우 어려운 까닭에, 모형의 모수화 과정을 통해 최적의 값을 선정하는 방식을 따른다. 본 연구는 단일 유역의 분배계수 모수화를 그대로 타유역에 적용하는 것은 식생성장 모사에 상당한 불확실성을 야기할 수 있음을 보였다. 향후 상대적으로 현장측정이 용이한 항목을 이용해 모형의 분배계수를 모수화하는 전략적 방안을 개발할 필요가 있다고 보여진다.

결론적으로, 단일 유역에서 모수화한 생태수문모형 RHESSys를 타유역에 적용하였을 때 유역의 수문현상은 유의미하게 모사한 반면, 식생성장의 예측력은 높지 못함을 발견하였다. 특히 토양수분 예측에는 각 유역의 공극률과 토양입도분포가 민감하게 영향을 미침을 확인하였고, 단일 유역의 모수화를 다유역으로 확장할 경우 각 유역의 수문특성을 반영하는 최소의 측정자료항목을 제안하였다. 그러나 현장자료의 부족으로 인해 식생성장에 영향을 미치는 여러 생물리/생화학/생리학적 모수값에 대한 개별적 민감도 평가가 미흡하였고, 다만 수문과정 모수에 비해 식생성장 및 분배관련 모수의 경우 단일 유역의 모수화를 타유역으로 확장하는 데에 상당한 불확실성이 있음을 확인하였다. 각 유역의 임목성장 및 분배 특성을 반영하는 독립적인 모수화 과정이 필요하며 이를 뒷받침 해줄 최소한의 현장측정항목을 발굴하는 후속연구가 필요하다.

적 요

전지구적인 생태시스템 안에서 탄소와 물의 흐름은 아주 밀접하게 관련되어 있다. 생태계 물질순환과정을 모사해 주는 모형들은 연구자들이 직접 측정하기 어려운 복잡한 생태계에서의 물질순환 과정들의 상호작용과 그 변화를 예측할 수 있는 도구이다. 이 연구에서는 생태수문모형 RHESSys(Regional Hydro Ecological Simulation System)를 광릉시험림 유역에서 모수화한 후, 다른 지형 조건과 기후 및 식생을 가진 점봉산

강선리 유역에 적용함으로써 RHESSys모수화의 다유역으로의 확장가능성과 문제점 등을 조사하였다. RHESSys는 Geographic Information System(GIS)를 바탕으로 공간적인 탄소와 물 및 영양분의 흐름을 모사하는 생태수문모형이다. 모수화는 광릉시험림 유역의 1982-1999년간 일유량과 나이트 자료로 추정된 임목성장량을 사용하였다. 수직 및 수평 방향의 수리전도도에 관련된 중요 모수들과 임목 성장과 관련된 분배 모수들을 Monte-Carlo 접근법을 사용하여 최적화하였다. 모형결과를 광릉연구지의 실측 토양수분과 비교해 본 결과 RHESSys는 토양수분을 다소 과소평가하는 경향이 있으나, 일변화를 유의하게 잘 모사하였으며, 임목성장량의 연변화를 잘 모사하였다. 광릉연구지에서 개발한 모수를 점봉산 강선리 유역에 적용한 결과, 광릉과 마찬가지로 RHESSys는 토양수분을 다소 과소평가하나 여름철의 중요한 시계열 경향을 유의하게 잘 모사하였다. 또한 실측 공극률의 사용이 모형의 토양수분예측력에 중요함을 확인하였다. 반면에 강선리 유역의 임목성장량에 대해선 모형의 예측력이 높지 않았다. 수문과정 모수에 비해 식생성장 및 분배관련 모수의 경우 단일 유역의 모수화를 타 유역으로 확장하는 데에 상당한 불확실성이 있음을 확인하였다. 각 유역의 임목성장 및 분배 특성을 반영하는 독립적인 모수화 과정이 필요하며 이를 뒷받침 해 줄 최소한의 현장측정항목을 발굴하는 후속연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-8-3), 국립산림과학원의 '지구환경변화에 대응한 장기생태연구' 과제, 교육인적자원부, 한국학술진흥재단의 Brain Korea 21-웰빙을 위한 환경 기술 개발인력 사업단의 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 점봉산과 광릉의 나이트 자료를 제공해주신 고동욱박사와 김영일님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Aber, J. A., and C. A. Federer, 1992: A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystem. *Oecologia* **92**, 463-474.

- Band, L. E., D. S. Mackay, I. F. Creed, R. Semkin, and D. Jeffries, 1996: Ecosystem process at the watershed scale: sensitivity to potential climate change. *Limnology and Oceanography* **41**(5), 928-938.
- Baron, J. S., M. D. Hartman, T. G. F. Kittel, L. E. Band, D. S. Ojima, and R. B. Lammers, 1998: Effects of land cover, water redistribution, and temperature on ecosystem processes in the South Platte basin. *Ecological Applications* **8**(4), 1037-1051.
- Csiszar, I., C. O. Justice, A. D. McGuire, M. A. Cochrane, D. P. Roy, F. Brown, S. G. Conard, P. G. H. Frost, L. Giglio, C. Elvidge, M. D. Flannigan, E. S. Kasischke, D. J. McRae, T. S. Rupp, B. J. Stocks, D. L. Verbyla, 2004: Land Use and Fires, *Land Change Science: Observing, Monitoring, and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*. Gutman, G. Janetos, A. C. Justice, C. O. Moran, E. F. Mustard, J. F. Rindfuss, R. R. Skole, D. Turner II, B. L. Cochrane, M. A. (Eds.), Dordrecht, Netherlands, Kluwer, Chapter 19.
- Eum, S., S. Kang, and D. Lee, 2005: Climatic controls on net primary production (NPP) of a rugged forested landscape in the mid-western Korean Peninsula. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1), 66-77.
- Famiglietti, J. S., and E. F. Wood, 1994: Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resources Research* **30**(11), 3061-3078.
- Go, D., 1999: Disturbance regime of a temperate hardwood forest as deduced from treeing patterns: Mt. Jumbong forest in Korea. M. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Hwang, T., S. Kang, Y. Kim, J. Kim, D. Lee, and L. E. Band, 2007: Evaluating drought effect on MODIS Gross Primary Production (GPP) with an eco-hydrological model in the Mountainous Forest, East Asia. *Global Change Biology* (in press)
- Jung, Y. H., K. H. Kim, C. Y. Lee, C. G. Jung, J. Y. Yu, and J. H. Jeun, 2002: Document of Long-term monitoring for forest hydrology. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea.
- Kang, S., S. Doh, D. Lee, D. Lee, L. J. Virginia, and J. S. Kimball, 2003: Topographic and climate controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology* **9**, 1427-1437.
- Kang, S., J. S. Kimball, and S. W. Running, 2006a: Simulating effects of fire disturbance and climate change on regional forest productivity and evapotranspiration in boreal ecosystems. *Science of The Total Environment* **362**, 85-102.
- Kang, S., D. Lee, J. Lee, and S. W. Running, 2006b: Topographic and climatic controls on soil environments and net primary production in a rugged temperate hardwood forest in Korea. *Ecological Research* **21**(1), 64-74.
- Kim, E., S. Kang, B. R. Lee, K. Kim, and J. Kim, 2007: Parameterization and application of Regional Hydro-Ecologic Simulation System (RHESSys) for integrating the eco-hydrological processes in the Gwangneung headwater catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**(2), 121-131.
- Kim, S., 2005: Spatial analysis of evapotranspiration in a forested watershed using energy balance model and RHESSys. M. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Kim, Y., 2006: Annual growth of standing biomass estimated with tree-ring data and biomass equation at a Gwangneung deciduous forest, Korea. M. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Landsberg, J. J., and R. H. Waring, 1997: A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* **95**, 209-228.
- Lee, H. Y., 2003: *GIS: Geographic Information System*, Bum Moon Sa, 606pp.
- Lim, J. H., 1998: A forest dynamics model based on topographically-induced heterogeneity in solar radiation and soil moisture on the Kwangneung Experimental Forest. Ph. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Lim, J. H., J. H. Shin, G. Z. Jin, J. H. Chun, and J. S. Oh, 2003: Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of Kwangneung natural forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), 101-109.
- Law, B. E., D. Turner, J. Campbell, O. J. Sun, S. Vantuyt, W. D. Ritts, and W. B. Cohen, 2004: Disturbance and climate effects in carbon stocks and fluxes across Western Oregon USA. *Global Change Biology* **10**, 1429-1444.
- Lee, G. Y., S. H. Kim, K. H. Kim, and H. S. Lee, 2005: Analysis of soil moisture recession characteristics on hillslope through the intensive monitoring using TDR. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1), 77-91. (in Korean with English Abstract)
- McMurtrie, R. E., D. A. Rook, and F. M. Kelliher, 1990: Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nutrition. *Forest Ecology and Management* **30**, 381-413.
- Meentemeyer, R. K., A. Moody, and J. Franklin, 2001: Landscape-scale patterns of shrub-species abundance in California chaparral. *Plant Ecology* **156**, 19-41.
- Ojima, D. S., D. S. Schimel, W. J. Parton, and C. E. Owensby, 1994: Long- and short-term effects of fire on nitrogen cycling in tallgrass prairie. *Biogeochemistry* **24**, 67-84.
- Oh, J. S., J. H. Shim, and J. H. Lim, 2000: Long-term ecological research programme in Forestry Research Institute, Korea. *Korea Journal of Ecology* **23**, 131-134.

- Parton, W. J., W. B. Stewart, and C. V. Cole, 1988: Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: A model. *Biogeochemistry* **5**, 109-131.
- Running, S. W., and J. C. Coughlan, 1988: A general model of forest ecosystem processes for regional applications: I. hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* **42**, 125-154.
- Tague, C. L., and L. E. Band, 2004: RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System-An object oriented approach to spatially distributed modeling of Carbon, Water, and Nutrient cycling. *Earth Interactions* **8**, 1-42.
- White, M. A., P. E. Thornton, S. W. Running, and R. R. Nemani, 2000: Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls. *Earth Interactions* **4**, 1-61.
- White, M. A., R. R. Nemani, P. E. Thornton, and S. W. Running, 2002: Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems* **5**, 260-277.
- Zierl, B., H. Bugmann, and C. L. Tague, 2007: Water and carbon fluxes of European ecosystem: An evaluation of the ecohydrological model RHESSys. *Hydrological Processes* **21**(25), 3391-3408.