광릉 활엽수림에서 Community Land Model 3.5-Dynamic Global Vegetation Model의 평가

임희정¹ · 이영희^{1*} · 권효정^{2,3}

¹경북대학교 천문대기과학과, ²연세대학교 대기과학과/지구환경연구소, ³서울대학교 국가농림기상센터

(2010년 3월 9일 접수; 2010년 6월 8일 수정; 2010년 6월 24일 수락)

Evaluation of Community Land Model version 3.5-Dynamic Global Vegetation Model over Deciduous Forest in Gwangneung, Korea

Hee-Jeong Lim¹, Young-Hee Lee^{1*} and Hyojung Kwon^{2,3}

¹Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University,

Sankyuk-dong 1370, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea

²Department of Atmospheric Sciences/Global Environmental Laboratory, Yonsei University,

Shinchon-dong 134, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

³National Center for Agro-Meteorology, College of Agriculture and Lifesciences,

Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

(Received March 9, 2010; Revised June 8, 2010; Accepted June 24, 2010)

ABSTRACT

The performance of Community Land Model version 3.5 - Dynamic Global Vegetation Model (CLM-DGVM) was evaluated through a comparison with the observation over temperate deciduous forest in Gwangneung, Korea. Influence of plant phenology, composition of plant functional type, and climate variability on carbon exchanges was also examined through sensitivity test. To get equilibrium carbon storage, the model was run for 400 years driven by the observed atmospheric data at the deciduous forest of the year 2006. We run the model for 2006 with the equilibrium carbon storage at Gwangneung forest and compared the model output with the observation. A comparison of leaf area index (LAI) between the model and observation indicated that the simulated phenology poorly represented the timing of budburst, leaf-fall, and evolution of LAI. Senescence of the phenology was delayed about four weeks and the simulated maximum LAI (of $5.8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) was greater than the observed value (of $4.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). The overestimated LAI contributed to overestimation of both gross primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (R_e) through increased photosynthesis and foliar autotrophic respiration (R_a), respectively. Despite the discrepancy between the simulated and observed LAI, the simulated tree carbon storage amounts were comparable with the reported values at the site. Change in plant phenology from the simulated to the observed reduced more than six weeks of the plant growth period, resulting in the decreased amount of GPP and R_e . These values, however, were still higher (~10% of GPP and 40% of R_e) than the observed values. The effect of change in plant functional type composition (from dominant temperate deciduous forest to the coexistence of temperate deciduous and needle leaf forests) on the estimated amount of GPP and R_e was marginal. The influence of climate variability on carbon storage amounts was not significant. The simulated inter-annual variation of GPP and R_e from 1994 to 2003 depended on annual mean air temperature and total radiation but not on precipitation. Other deficiencies of CLM3.5-DGVM have been discussed.

Key words : Carbon budget, CLM3.5-DGVM, Plant phenology, Sensitivity test

* Corresponding Author : Young-Hee Lee (young@knu.ac.kr)

I. 서 론

식생은 기후시스템을 구성하는 한 성분으로 지표면의 알베도나 수분 가용도, 지표면 거칠기의 변화를 통해 에너지와 물 순환과정에 영향을 미칠 뿐만 아니라 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소의 농도를 조절함으로써 대기의 복사강제력의 변화를 초래한다. 이와 같이 식생은 에너지, 물 그리고 탄소순환에서 중요한 역할을 담당하고 있으므로 기후변화의 보다 현실적인 예측을 위해서는 기후와 식생의 상호작용을 고려하는 것이 필요하다. 식생과 기후의 상호작용은 기후모델에 접합되어 있는 지표생태모델을 통해 고려된다. 지표생태모델(terrestrial ecosystem model)은 크게 생지화학 모델(biogeochemical model)과 역학식생모델(dynamic global vegetation model)로 나눌 수 있다. 생지화학 모델에서는 기후변화에 따른 식생 종의 변화는 고려되지 않으며, 주어진 식생 종의 분포에 따른 탄소와 질소들의 순환과정이 다루어진다. 모델로 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 모델이나 Biome 모델(Prentice *et al.*, 1992)들이 이에 해당한다. 반면에 역학식생모델은 기후변화에 따른 식생 종의 변화를 함께 고려할 수 있다. 따라서 짧은 시기의 기후변동성에 대해서는 생지화학모델의 이용이 적합한 반면, 식생 종의 변화를 수반하는 보다 장기간에 걸친 기후변화를 모의하고자 하는 경우에는 역학식생모델을 사용해야 한다.

역학식생모델을 기후모델에서 사용하기 위해서는 모델에 대한 평가가 우선적으로 수행되어야 한다. Bonan *et al.*(2003)은 Lund-Potsdam-Jena(LPJ)의 역학식생모델이 결합된 지표면 모수화 모델인 LSM-DGVM(Land Surface Model-Dynamic Global Vegetation Model)의 엽면적지수(leaf area index, LAI)와 식생 종의 분포에 대한 모의 능력을 전 지구에 대해서 평가하였고 툰드라, 열대 우림, 보리아스 산림 그리고 북아메리카 온대 산림지의 4지점에 대해서 주요 생물량(biomass)과 탄소 교환량의 모의 능력을 평가하였다.

동아시아 지역에서의 역학식생모델의 평가에 대한 연구는 상대적으로 적게 이루어졌다. 동아시아 지역은 계절풍의 영향을 받는 지역으로 같은 온대 산림지라 하더라도 유럽이나 북아메리카 지역과 다른 기후특성을 지니므로 동아시아 지역에서의 생태 관측 값을 이용한 역학식생모델의 성능 평가가 필요하다. 한반도

지역에서는 관측을 통한 탄소순환에 대한 연구들(Kwon *et al.*, 2010)은 있었지만 모델링을 이용한 탄소순환에 관한 연구는 많이 이루어지지 않은 실정이다.

본 연구에서는 광릉의 활엽수림에서 관측된 생태자료들을 이용하여 CLM3.5-DGVM(Community Land Model 3.5-Dynamic Global Vegetation Model)의 탄소교환과정에 대한 모의능력을 평가하고자 한다. 생 기후 제한조건 (bioclimatic condition)과 식물계절학이 탄소수지에 미치는 영향을 조사하기 위하여 민감도 실험을 수행하였고 또한 기후 변동성이 탄소순환에 미치는 영향을 조사하기 위하여 모델에서 모의된 탄소수지와 기후변동성의 관계를 분석하였다.

II. 관측지의 특성과 자료

분석 지역은 KoFlux 관측지 중 하나인 광릉의 활엽수림(37°45'25.37"N, 127°09'11.62"E, 90-470m.s.l) 지역이다. 타워가 설치된 곳은 동서방향으로 약 10°의 경사를 가지고 있다. 평균 식생 높이는 18m이고 주 수종은 활엽수인 떡갈나무(Serrata Oak)이며 최대 식생면적지수 (plant area index, PAI)는 약 5.8이다. 관측지에 대한 자세한 정보는 Lim *et al.*(2003)에서 볼 수 있다. 난류 플럭스는 에디 공분산 시스템을 이용하여 40m와 20m에서 측정되었고 상향, 하향 단파복사와 하향 장파 복사는 40m에서 측정되었다. 본 연구에서는 식생 성장기간에 걸쳐서 적었던 2006년 자료를 분석에 사용하였으며 사용된 자료는 관측된 기상장과 LAI이다. 본 연구에서는 잎이 없는 겨울철 PAI 값을 줄기면적지수(stem area index, SAI)로 간주하여 LAI를 계산하였다. 이렇게 계산된 광릉활엽수림의 SAI 값은 1.3이고 최대 엽면적 지수(LAI)는 4.5이다.

관측된 30분 간격의 기상장은 모델을 오프라인(offline) 모드로 운영하는데 입력 자료로 사용되었다. 사용된 기상장은 풍속, 온도, 비습, 기압, 강수, 그리고 태양의 단파복사와 대기의 하향 장파 복사이다. 1년간 모델 수행에 있어 입력장 결측의 보충(gap filling)은 3시간 이내의 결측은 단순 내삽을 통하여 보충하였고 그 이상의 결측은 가장 인근(20km 이내에 위치)의 정규 기상 관측소인 동두천(37° 54' N, 127° 04' E, 112.5m)의 자료를 이용하여 보충하였다. 측정 변수 별 결측 보충 방법은 Lee and Lim(2009)과 동일하다.

2006년 광릉에서의 기온과 총 강수량은 각각 11.3

와 1625mm로 기온은 평년과 같고 강수는 평년값(1365mm)에 비해 19% 증가하였다. 대부분의 강수가 7월에 집중되어 발생하였으며 이로 인해 7월의 일사량의 감소가 현저하였다.

기후변동성이 평형상태의 탄소저장량에 미치는 영향을 조사하기 위한 모델 수행에서는 10년 이상의 기상 자료를 갖는 관측소 중에서 광릉에서 가장 가까운 정규 기상 관측소인 서울(37° 34' N, 126° 57' E, 85.5 m)의 2006년 한해 기상관측 자료와 1994년부터 2003년까지 10년간의 기상관측 자료를 모델 입력자료로 사용하였다.

III. 방 법

3.1. CLM3.5-DGVM model

사용된 모델은 CLM3.5-DGVM 이다. CLM은 CAM(Community Atmosphere Model)에 사용되는 지표면 모수화 모델로서 대기 모델에서 필요로 하는 지표면 반사도, 상향복사, 현열 플럭스, 잠열 플럭스, 수증기 플럭스, 그리고 운동량 플럭스 등을 제공한다(Oleson *et al.*, 2004). 지표면 모수화 과정은 생태학적 과정과 수문학적 과정으로 구성되어 있다. 모델에서 생태학적 과정은 16개로 구분되어 있는 식생형태에 따라 계산된다. 토양 층은 10층으로 구성되어 있고 식생 층은 1층으로 구성되어 있으며 햇빛이 비치는 잎과 그늘진 잎으로 구분되어 있다. 플럭스들은 격자 내에 식생 형태에 따라 구분하여 계산되고 각 식생이 차지하는 비율을 고려하여 격자 평균 플럭스 값을 산출한다. 본 연구에서 사용된 역학 식생 모델은 LPJ(Lund-Potsdam-Jena)모델이다. CLM3.5-DGVM에서는 세 가지 시간 규모가 사용되는데 30분 간격으로 생지물리와 생지화학 과정이 계산되고 하루 단위로 LAI의 계산이 이루어지며 탄소 저장량의 계산은 1년에 한 번씩 이루어진다. CLM3.5-DGVM은 광합성과정과 자가영양호흡, 종속영양호흡 과정을 통해 대기와 지표면간의 탄소 교환 과정을 모의하고 탄소할당(allocation), 순환(turnover), 사망률(mortality), 화재(fire) 그리고 경쟁(competition) 과정을 통해 탄소 저장량의 변화와 식생종의 변화를 모의한다. 모델에 대한 자세한 내용은 Levis *et al.*(2004)에 제시되어 있다. 여기서는 본 연구에서 주로 다루어진 탄소순환과 관련된 모델과정만 간략히 소개하였다.

3.1.1. 탄소 순환 과정

생태계의 연간 총 생산량(gross primary production, GPP)은 광합성을 통해 대기로부터 식생에 고정되는 CO₂의 양을 나타내는 지표이다. 모델에서 C₃식물의 광합성은 Farquhar *et al.*(1980)과, Collatz *et al.*(1991)의 광합성반응모델을 기초로 하여 30분마다 계산된다. 광합성 계산 시 Rubisco에 의한 제한 (W_c), 빛에 의한 제한(W_j), 그리고 triose phosphate가 녹말(starch)과 자당(sucrose)의 합성에 사용되는 정도 (export)에 의한 제한(W_e)이 적용되며, 각각의 제한 요인에 따라 계산된 값의 최소값이 최종 해당 시간의 광합성량으로 산출된다(Oleson *et al.*, 2004).

$$A = \min (W_c, W_j, W_e) \quad (1)$$

이때, A 는 모델에서 모의된 광합성량을 의미한다. 본 연구의 모델 수행에서 실제 광합성량의 계산 시 사용되는 질소 제한 파라미터를 CLM3.5 문서 (Oleson *et al.*, 2007)의 표 G1을 따라 수정 하였으며 잠재 광합성량의 계산 시 사용되는 최대 카르복실화률도 수정 전후의 질소제한인자의 비를 곱하여 수정하였다.

생태계에서 광합성으로 합성된 물질의 일부는 잎, 줄기, 뿌리의 성장과 유지를 위한 자가영양호흡(autotrophic respiration, R_a)으로 사용된다. 모델에서 R_a 는 유지호흡(maintenance respiration, R_m)과 성장호흡(growth respiration, R_g)으로 나누어 계산된다. R_m 은 특정 조직(specific tissue)의 C:N(탄소: 질소) 비와, 온도, 토양 위와 아래 조직의 생물량, 그리고 식물계절학 함수 (Φ)로 계산되며, R_g 는 GPP와 R_m 의 차이의 0.25배로 할당된다.

주요 탄소 교환량들의 관계는 다음과 같다.

$$R_g = 0.25 (GPP - R_m) \quad (2)$$

$$NPP = GPP - R_a \quad (3)$$

$$NEE = R_e - NPP \quad (4)$$

$$R_e = R_a + R_h \quad (5)$$

여기서 NPP(net primary production)는 연간 순 생태 생산량, R_h (heterotrophic respiration)는 미생물의 활동에 의해 분해되는 과정으로 종속영양호흡을, R_e (ecosystem respiration)는 생태 호흡량, 그리고 NEE(net ecosystem exchange)는 순 생태 교환량을 나타낸다.

Table 1. Bioclimatic limits for plant functional type (PFT); $T_{c,min}$ =minimum coldest-month temperature survival; $T_{c,max}$ =maximum coldest-month temperature for establishment; GDD_{min} =minimum degree-day sum for establishment

PFT	$T_{c,min}(^{\circ}C)$	$T_{c,max}(^{\circ}C)$	GDD_{min}
Temperate broad-leaved deciduous tree (BDT)	-17.0	15.5	1200
Temperate broad-leaved evergreen tree (BET)	3.0	18.8	1200
Temperate needle-leaved evergreen tree (NET)	-2.0	22	900
Temperate herbaceous (C_3)	-17.0	15.5	0

3.1.2. 식생 분포

모델에서 식생 분포는 각 식생 별 성장 가능한 기후조건을 이용하여 계산된다(Levis *et al.*, 2004). 최한월의 최저 온도와 최고 온도, 5 이상의 누적성장도일(growing degree days, GDD)이 사용되며 이들 변수들의 20년 평균값을 기준으로 각 식생 종의 존재 유무가 결정된다. 한반도에서 주로 서식하는 4가지 식생 종류에 대한 생 기후 제한조건을 Table 1에 제시하였다.

3.1.3. 식물계절학

식물계절학은 개엽과 낙엽 시기를 통해서 표현되며, 지표면의 알베도와 거칠기 변화를 통해서 지표의 수분과 에너지, 이산화탄소 플럭스의 변화에 영향을 미친다. 개엽과 낙엽 시기는 식생의 생육 기간을 결정하므로 연간 탄소 흡수율은 식물계절학과 밀접한 관계를 가진다. 본 연구에서 사용된 모델에서 LAI의 계산은 다음과 같다(Levis *et al.*, 2004).

$$LAI = \Phi LAI_{max} \quad (6)$$

여기서 LAI_{max} 는 최대엽면적 지수를 나타내며 Φ 는 식물계절학(phenology)을 나타내는 함수로 잎의 낙하와 나옴 시기에 따라 다음과 같이 계산된다.

잎의 낙하(leaf fall)

$$\Phi = \Phi - \frac{1}{15} \geq 0 \text{ when } T_{10d} < \max(T_f, T_c + 5) \quad (7)$$

잎의 나옴과 성장(leaf out and leaf maturity)

$$\Phi = \frac{(CDD_{0C} - 100)}{50} \text{ when } T_{10d} \geq \max(T_f, T_c + 5) \quad (8)$$

여기서 GDD_{0C} 는 0°C 이상의 누적 성장도일을 나타내며 T_f 는 273.16 K, T_c 는 20년 이동 평균한 최한월의 온도이다. 그리고 T_{10d} 는 10일 이동 평균한 대기 온도이다.

3.2. 실험 설계

3.2.1. 평형 상태의 탄소 저장량을 생산하기 위한 모델 수행

현 기후 조건에서 평형상태의 탄소저장량을 얻기 위해 광릉에서 관측된 2006년 한 해의 기상장과 복사장을 반복적으로 사용하여 400년간 모델을 수행하였다. 그리고 산출된 결과가 실제 광릉의 탄소저장량을 반영하는가를 조사하기 위해 광릉 활엽수림 지역에서 선행 연구된 문헌을 바탕으로 비교 분석을 수행하였다.

3.2.2. 식물 계절학과 생 기후 제한조건에 대한 민감도 실험

본 연구에서는 생 기후 제한조건과 식물계절학의 변화가 탄소수지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 민감도 실험을 수행하였다(Table 2). Case 0은 아무런 조건도 바꾸지 않은 기본(default) 실험으로 400년간 모델 수행을 통해 모의된 평형상태의 탄소저장량을 입력 자료로 사용하여 1년간 모델을 수행한 것이다. Case 1은 식물계절학의 현실적 제공이 탄소 수지에 미치는 영향을 조사하기 위해서 설계된 실험으로 Case 0에서 모의된 평형상태의 탄소저장량을 초기값으로 사용하고 모델의 식물계절학 함수를 사용하는 대신 관측 LAI로부터 유도된 식물계절학 함수를 사용하였다. Case 2에서는 모의되는 식생 종의 구성이 탄소수지에 미치는 영향을 조사하기 위하여 침엽수림과 활엽수림이 공존할 수 있도록 온대 침엽수의 최소 생존 한계 온도를

Table 2. Summary of sensitivity test design

	Penology	Bioclimatic Condition
Case 0	Default	Default
Case 1	Observed LAI	Default
Case 2	Default	$T_{c,min} = -2.5^{\circ}C$ for Conifer
Case 3	Observed LAI	$T_{c,min} = -2.5^{\circ}C$ for Conifer

$T_{c,min}$: the minimum coldest-month temperature for survival.

-2°C에서 -2.5°C로 바꾸어서 모델을 400년간 수행하여 평형상태의 탄소저장량을 구하고 이를 초기값으로 사용하여 모델을 1년간 수행하였다. 마지막으로 Case 3에서는 Case 2에서 얻어진 평형상태의 탄소 저장량을 초기값으로 사용하고 관측 LAI로부터 유도된 식물계절학 함수를 사용하여 1년간 모델을 수행하였다. LAI_{max}는 잎의 질량 등의 생태 탄소량과 관련되어 있어 Case 1과 Case 3에서 LAI_{max}는 변화시키지 않고 식물계절학 함수만 변화시켰다. 결과 분석에는 광릉지역에서 관측된 LAI 자료와 문헌에서 보고된 탄소 저장량과 교환량 자료가 사용되었다.

3.3. 기후변동성에 대한 탄소 순환의 민감도 실험

광릉지역의 경우 오랜 기간 동안의 관측자료가 없으므로 기후변동성의 고려 없이 2006년의 한해 자료를 반복적으로 사용하여 평형상태의 탄소저장량을 구한 후 모델결과를 관측결과와 비교하였다. 기후변동성이 평형상태의 탄소저장량과 탄소 교환량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 광릉지역과 가장 가까우면서 긴 관측기간을 갖고 있는 서울지역의 자료를 사용하여 10년간의 기후변동성이 고려된 경우와 2006년 한 해의 자료만을 입력자료로 사용했을 때의 모델 수행결과를 비교 분석하였다. 또한 평형상태에 도달한 탄소저장량을 초기값으로 사용하여 1994년부터 2003년까지 모의된 연간 탄소수지 성분들의 변화를 분석하였다.

IV. 결 과

4.1. 모델 수행 능력 평가

4.1.1. 식생 분포

광릉 활엽수림에서 2006년에 관측된 기상장과 복사장을 사용하여 400년간 모델을 수행한 결과 식생은 온대 활엽수(temperate broadleaved deciduous tree)와 초지(C₃ non-arctic grass)가 모의 되었으며 각각 격자 면적의 95%와 5%를 차지하였다. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer) 위성자료를 이용한 한반도의 지표면 피복 분류 결과 (Kang *et al.*, 2005)에 따르면 광릉활엽수림 주변 지역은 활엽수와 침엽수림이 공존하는 혼합림지역이다. 또한 산림청의 지역별 산림기본통계에서도 광릉 활엽수림을 포함하는 포천시와 인근의 의정부시, 동두천시에서 침엽수림과 활엽수림 그리고 혼효림이 공존하는

것으로 보고되어 있으나 모델에서는 침엽수가 생존 조건이 성립되지 않아 모의되지 않았다. 모델에서 온대 침엽수(temperate needle leaved evergreen tree)의 경우 최소생존한계온도는 -2°C로 설정되어있으나, 모의된 20년 평균 월 최저온도가 -2°C보다 약간 낮음에 따라 온대 침엽수의 생존이 불가능하였다. 또한 모델에서는 생존온도보다 낮아지면 모든 식생이 다 죽도록 설정되어 있어 초기 25년까지 존재하던 침엽수가 0.1°C 차이로 한 해에 모두 죽게 되는 비현실적인 결과를 보이고 있다. 역학식생과정을 현실적으로 모의하기 위해서는 이 부분의 개선이 필요할 것으로 사료된다.

4.1.2. 엽면적지수

모의된 LAI_{max}는 5.8로 광릉에서 관측 보고된 4.5 (Park *et al.*, 2006)보다 약간 높게 계산되었다. LAI_{max}의 과대 모의는 접합에 사용된 두 모델이 서로 다른 식생구조에 맞게 보정되었다는 점에 일부 기인할 수 있다. Levis *et al.* (2004)은 역학식생 모델은 단 잎(single leaf) 모델에 맞게 보정된 반면 CLM3.5는 두 잎(two leaf) 모델에 맞게 보정됨으로써 서로 다르게 보정된 모델을 접합시킨 CLM3.5-DGVM이 LAI_{max}를 과대 모의하는 결과를 초래한다고 보고하였다.

Fig. 1은 모의된 식물계절학 함수와 2006년 광릉에서 관측된 LAI를 통해 유도된 식물계절학 함수를 보

Fig. 1. Seasonal variation of phenology parameter (Φ). The solid line indicates Φ simulated by CLM3.5-DGVM with default, while the dotted line indicates Table 6. Simulated carbon pools with and without climate variability.

여준다. 모델은 개엽 시기를 잘 모의하지만, 개엽에서 잎의 성숙기까지의 기간은 관측보다 짧게 모의하며, 낙엽 시기는 관측보다 한 달 이상 늦게 모의한다. 이로 인해 모델은 식물의 생장기간을 실제보다 과대 모의하고 있다. 또한 모델에서는 생장 기간 동안 LAI가 일정한 값을 유지하는 반면 관측 값에서는 초여름에 최대값을 보인 후 감소함으로써 LAI_{max}는 약 1의 차이를 가지지만 생장기간의 엽면적 지수의 차이는 더 커짐을 알 수 있다.

4.1.3. 탄소저장량

모델에서 모의되는 탄소저장량은 식생 탄소저장량과 토양 탄소저장량으로 나뉜다. 식생 탄소저장량은 잎, 뿌리, 물관부, 그리고 목관부의 탄소저장량으로 세분된다. 모의된 잎, 뿌리, 물관부, 그리고 목관부의 탄소저장량은 각각 1.5 t C ha⁻¹, 2.3 t C ha⁻¹, 27.3 t C ha⁻¹ 그리고 128.2 t C ha⁻¹이며 전체 식생 탄소저장량의 합은 159.3 t C ha⁻¹로 계산되었다(Table 3). Lim *et al.*(2003)은 광릉 지역에서 지하부를 포함한 임목에 저장된 탄소저장량은 136.0 t C ha⁻¹로 보고하였는데 이 수치는 이에 해당하는 모델 값인 157.8

t C ha⁻¹와 유사하다.

토양 탄소저장량은 낙엽층의 탄소저장량과 토양층의 탄소저장량으로 구성된다. 모델에서 낙엽층의 탄소저장량은 다시 토양 위 낙엽층의 탄소저장량과 토양 아래 낙엽층의 탄소저장량으로 나뉘며, 토양층의 탄소저장량은 빠르게 분해되는 토양 탄소저장량과 느리게 분해되는 토양 탄소저장량으로 다시 세분화된다.

모델에서 모의하고 있는 토양 위 낙엽층의 탄소저장량은 9.1 t C ha⁻¹이며 관측된 낙엽층의 탄소저장량(5.6 t C ha⁻¹, Lim *et al.*, 2003)의 약 1.6배로 모의되었다. 모의된 토양 아래 낙엽층의 탄소저장량은 6.0 t C ha⁻¹이고 빠르게 분해되는 토양 탄소저장량과 느리게 분해되는 토양 탄소저장량은 각각 59.8 t C ha⁻¹와 8.0 t C ha⁻¹로 모의되었다. 그러므로 모델에서 모의된 토양 아래에서의 총 탄소저장량은 73.8 t C ha⁻¹이었다. Lim *et al.*(2003)에서 보고된 토양 아래 30cm 층에서의 탄소저장량은 92.0 t C ha⁻¹이다. 전체 토양층에서의 탄소저장량은 토양 아래 30 cm 층에서의 값보다 더 클 것으로 예상되므로 모델이 토양 탄소저장량을 과소 모의하고 있음을 알 수 있다. 토양 위의 낙엽층이 과대 모의되어짐에도 불구하고 토

Table 3. Comparison of carbon pool amount (i.e., carbon storage and litter) and LAI between the simulated and reported values at different plant functional type (PFT)

		Reported values (References)	Default		Changed bioclimatic condition		
PFT (%)		Mixed forest	BDT (95) C3 (5)		BDT ^a (20) NET ^b (75) C3 ^c (5)		
Equilibrium carbon storages (t C ha ⁻¹)	Tree	Leaf	1.5		1.7		
		Root	2.3		2.5		
		Sapwood	136.0	27.3	157.8	22.6	92.6
		Heartwood	(Lim <i>et al.</i> , 2003)	128.2	65.9		
	Soil	Above ground litter	5.6 (Lim <i>et al.</i> , 2003)	9.1		10.6	
		Below ground litter		6.0		7.0	
		Fast response carbon pool	92.0 (Lim <i>et al.</i> , 2003)	59.8	73.8	70.0	86.8
		Slow response carbon pool		8.0		9.8	
Annual increasement of litter (t C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Above ground	2.8 (Lim <i>et al.</i> , 2003)	3.4		3.9		
	Below ground	-	2.3		2.6		
LAI _{max}		4.5 (Park <i>et al.</i> , 2006)	5.8		6.6		

^aBDT: broad-leaf deciduous temperate tree; ^bNET: needle-leaf evergreen temperate tree

^cC3: C₃ non-arctic grass

양 아래 탄소저장량이 적은 것은 분해된 낙엽층이 토양의 탄소로 전환되는 비율이 작은데 기인한 것으로 사료된다. 현재 모델에서는 분해된 낙엽층의 30%는 토양 탄소저장량으로 배분되며, 나머지 70%는 대기 중으로 배출되도록 설정되어 있다. 연간 토양 위 낙엽 낙지량은 $3.4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이며 보고된 연간 낙엽 낙지량($2.8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, Lim *et al.*, 2003)의 약 1.2 배로 모의되었다. 이는 엽면적 지수의 과대모의에 기인한다.

4.1.4. 탄소 교환량

Table 4는 모델에서 모의된 주요 탄소 교환량과 광합성과 온대 활엽수림에서 보고된 문헌값을 함께 제시한 것으로, 모델에서 GPP와 R_e 모두 과대 모의됨을 알 수 있다. GPP 과대모의의 원인은 긴 생장기간과 생장기간 동안의 LAI의 과대모의로 사료된다. 또한 LAI의 과대모의는 잎의 유지호흡을 과대모의 함으로서 R_e 의 과대모의에도 기여하고 있다. R_a 의 경우, 광합에서의 관측값이 없어 비슷한 기후와 위도를 가지는 일본의 온대활엽수림에서 추정된 R_a 와 비교하였다. 이때 R_a 의 총량은 지역과 기온조건에 따라 차이가 있을 수 있으므로 조직 별 호흡량의 상대적인 크기만 비교하였다. Ito *et al.*(2007)에 의하면 잎에서의 R_a 가 가장 많고 줄기(stem)에서의 R_a 가 가장 적다. 반면 현 모델에서는 식 (2)에서와 같이 R_g 를 식물 조직별로 계산하지 않으므로 조직별로 관측된 R_a 와의 직접 비교는 어렵지만 조직별 R_m 을 보면 줄기에서 가장 높은 값을 보이며 잎에서 가장 낮은 값을 보여 현 모델이 줄기에서의 R_a 를 다른 조직에 비해 과대 모의하는 것으로 사료된다.

NPP는 $605 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 관측값 보다 1.4배 높게 모의되었다. NPP는 GPP와 R_a 의 차이이므로 모델에서 NPP를 과대모의 한다는 것은 현재 과대모의 정도가 R_a 보다 GPP에서 상대적으로 더 큼을 암시한다. 성숙된 임목의 경우 표준 성장률의 둔화가 관측되거나 LPJ에서는 임목의 수령을 고려하지 않은 점이 NPP의 과대 모의의 한가지 원인으로 사료된다(Sitch *et al.*, 2003).

R_h 도 모델에서 1.4배정도 과대 모의되고 있으며 (Min *et al.* 2007; Lee *et al.* 2007) 1.2배 과대 모의된 낙엽층의 탄소저장량이 한가지 원인으로 사료된다. Suh *et al.*(2005b)에서 제시한 광동활엽수림의 낙엽분해율은 조사지의 우점종(졸참나무 $k=0.28$, 서어나무 $k=0.30$, 까치박달 $k=0.46$)마다 차이가 있었으나 모델에서 모의한 연간 낙엽분해율($k=0.47$)보다 다소 낮은 값을 보였다. 이는 모델의 낙엽 분해율이 높음에도 불구하고 생산되는 낙엽의 양이 많아 낙엽층의 탄소 저장량이 과대 모의되는 것으로 사료된다.

4.2. 민감도 실험 결과

수종의 조성이 평형상태의 탄소 저장량에 미치는 영향을 조사하기 위해서 온대 침엽수림의 최소 생존한계 온도를 -2.5°C 로 설정하여 두 수종이 공존할 때의 온대 활엽수림에서의 평형상태의 탄소 저장량을 분석하였다. 온대 활엽수림에서 모의된 잎, 뿌리, 물관부 그리고 목관부의 탄소저장량은 각각 1.7 t C ha^{-1} , 2.5 t C ha^{-1} , 22.6 t C ha^{-1} 그리고 65.9 t C ha^{-1} 이다(Table 3). 온대 활엽수림만 존재할 때보다 두 수종이 공존하는 경우 잎과 뿌리의 탄소저장량은 크게 모의되었고 물관부와 목관부의 탄소저장량은 적게 모의

Table 4. Comparison of carbon budget components (NPP, GPP, R_h , R_a , and R_e) between the simulated and reported values in literatures at temperate deciduous forest at Gwangneung and other locations in East Asia Unit: $\text{gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$

Simulation					Observation		References	
NPP	604.7				430.0		Lim <i>et al.</i> (2003)	
GPP	1554.4				1020.0		Kwon <i>et al.</i> (2010)	
R _h	567.8				410.0		Min <i>et al.</i> (2007)	
R _a	949.2	R _m	foliar	156.1	742	foliar	328.0	Ito <i>et al.</i> (2007)
			stem	281.7		stem	134.0	
			root	215.8		root	290.0	
		R _g		295.7				
R _e	1517.0				947.0		Kwon <i>et al.</i> (2010)	

Table 5. Simulated carbon budget from four different case studiesUnit : $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$

	GPP	R_a	R_h	R_e	NPP	NEE
Case 0	1554.0	949.2	567.8	1517.0	604.7	-36.9
Case 1	1152.1	752.1	600.5	1352.6	400.1	200.5
Case 2	1607.3	952.6	649.2	1601.8	654.7	-5.5
Case 3	1220.5	744.5	669.2	1413.6	476.0	193.1

되었다. 특히, 목관부의 탄소저장량은 크게 감소하였다. 목관부의 탄소저장량이 크게 감소한 이유는 두 수종이 공존하므로 인해 한 수종만 존재할 때처럼 크게 자라지 못하는데 기인한다.

모의된 토양 위와 아래의 낙엽층의 탄소저장량은 증가하였다. 이는 잎과 뿌리의 탄소저장량의 증가에 따라, 순환(turnover)에 의해 생산되는 낙엽량 증가와 격자 내 나무 수 증가로 인한 자체 조율에 따른 낙엽생산량의 증가에 기인한다.

Table 5는 민감도 실험에서 모의된 탄소수지를 나타낸 것이다. GPP의 최고값은 Case 2에서 $1609 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 로 모의되었으며, Case 0와 비교해 볼 때 $\text{LAI}_{\max}$ 가 5.8에서 6.6으로 증가함에 따라 GPP도 증가한 것으로 사료된다. Case 1과 Case 3에서는 실제적인 식물계절학이 반영됨에 따라 종전보다 식물의 생장기간이 줄어들고 생장기간의 LAI 값도 감소하여

GPP양이 현저히 감소하였지만 여전히 관측값에 비해 과대 모의되고 있다. 실제 식물계절학을 고려하였음에도 불구하고 GPP가 과대 모의되는 것은 약 1.3배 과대 모의된 $\text{LAI}_{\max}$ 가 일부 기여했을 것으로 사료된다.

Case 1과 Case 3에서 LAI 가 줄어들에 따라 GPP가 현저히 감소하였지만 R_e 의 감소는 크지 않아 NEE가 양의 부호로 바뀌었다. 하지만 광릉지역에서 관측된 NEE는 광릉활엽수림이 탄소의 흡수원임을 보였다 (Kwon *et al.*, 2010). 모델에서 좀더 현실적인 식물계절학을 사용함에도 불구하고 NEE를 제대로 모의하지 못한 것은 현재 모델에서 LAI 의 변화에 따른 생태호흡의 변화를 제대로 반영하지 못하는데 기인한 것으로 사료된다. R_a 에서 잎의 비중이 큰 경우 LAI 의 감소는 훨씬 효과적으로 R_e 의 변화를 초래할 수 있는 반면 현 모델에서처럼 R_e 에서 줄기 비중이 큰 경우 R_e 는 LAI 의 변화에 대해 덜 민감하게 된다. 그러므로

Fig. 2. Inter-annual variation of (a) precipitation, (b) mean air temperature, and (c) total solar radiation from 1994 to 2003 at Seoul station of Korea Meteorological Administration.

이의 개선을 위해서는 R_a 의 계산에 있어 잎과 줄기 비중이 현실적으로 모의될 수 있도록 조정하는 것이 필요할 것으로 사료된다. Case 1과 Case 3의 경우는 GPP가 낮아짐에 따라 격자 내 활엽수림의 면적이 감소하고 따라서 제거되는 임목이 낙엽량으로 추가되면서 R_h 값이 다소 증가하였다.

생 기후 제한조건을 바꾼 경우(Case 2와 Case 3) 잎과 뿌리의 탄소저장량과 연 생물량 증가에 기인한 낙엽량 증가가 R_h 를 증가시킨 것으로 사료된다. 하지만 Case 2에서 잎과, 뿌리, 물관부의 질량은 Case 0와 큰 차이를 보이지 않으므로 두 결과간의 R_a 의 차이는 매우 작게 나타났다.

4.3. 기후변동성이 탄소 순환에 미치는 영향

1994년부터 2003년까지의 총 강수량과 기온, 총 일사량의 변화를 Fig. 2에 제시하였다. 1994년이 가장 적은 강수를 1998년이 가장 많은 강수를 보이고 1995년과 1996년이 최저 기온을 그리고 1998년이 최

고 기온을 보이고 있다. 반면 일사량은 강수가 많았던 1998년에 최저값을 그리고 2002년에 최대값을 보인다. 2006년의 총 강수량은 1682mm이며, 기온은 13로 1994년부터 2003년의 10년간 평균 총 강수량인 1517.6mm보다 높은 강수를 보였으며, 기온은 10년간 평균 기온인 12.9°C와 비슷하였다.

Table 6은 기후 변동성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 탄소저장량을 나타낸 것이다. 두 모의 결과는 10% 이하의 작은 차이를 보인다. 10년의 기후 변동성이 고려되었을 경우가 고려되지 않은 경우보다 식생 탄소저장량은 약간 큰 값을 보이는데 이는 기후 변동성에 의해 성장이 제한되어지기 보다는 2006년보다 생산이 더 많은 해가 고려되어짐으로 인해 다소 식물생산이 증가한 데 기인한다. 이 지역의 기후 변동성이 평형상태의 탄소저장량에 미치는 영향은 크지 않으므로 광릉지역에서 2006년 한해 자료만을 반복 사용하여 얻어진 평형상태의 탄소저장량을 생태 관측값과 비교하는 것은 타당하다고 사료된다.

Table 6. Simulated carbon pools with and without climate variability

Unit : gC m^{-2}

		2006 year only	10 year variation	Difference (%)
Plant Carbon	Leaf	157.1	160.1	1.8
	Sapwood	2105.1	2222.8	5.3
	Root	235.2	238.2	1.2
	Heartwood	6643.3	7082.8	6.2
Soil Carbon	Litter_ag	945.8	993.9	4.8
	Litter_bg	624.9	612.8	2.0
	Cpool_fast	6196.2	5992.7	3.4
	Cpool_slow	901.5	888.5	1.5

*Cpool: Carbon pool, ag: above ground, bg: below ground

Fig. 3. Inter-annual variation of (a) GPP and R_e , and (b) NEE.

Fig. 3은 1994년부터 2003년까지 모델에서 모의된 GPP, R_e , 그리고 NEE의 연간 변동성을 나타낸 것이다. 모델에서 생태계로부터 최대 탄소 흡수가 나타나는 해는 2002년으로 GPP가 최대값을 보이고 R_e 는 평균에 가까운 값을 보인다. GPP가 최대값을 보이는 것은 일사량이 2002년에 가장 높은 값을 가지는 것에 기인한다. 반면에 기온은 평년과 유사해 R_e 는 크게 나타나지 않았다. 모델에서 가장 적은 탄소 흡수를 보인 해는 1998년으로 GPP는 평균값과 유사한 값을 보이거나 높은 온도로 인해 R_e 가 높게 나타난 것에 기인한다. 온도가 높았던 1994년과 1998년 모두 높게 모의된 R_e 로 인해 생태계에 의한 탄소 흡수는 작게 나타난 것으로 사료된다. 1995년과 1996년은 낮은 온도로 인해 GPP와 R_e 모두 낮은 값을 보였다. 이는 낮은 기온으로 인해 생장 기간이 짧아져서 모의된 GPP가 감소하고 또한 R_e 도 낮은 온도로 인해 감소한 것에 기인한다.

Figs. 4는 모의된 GPP와 기후 인자들의 관계를 분산도로 나타낸 것이다. 모델에서 총 강수량은 GPP와

상관성을 보이지 않는다(Fig. 4a). 이는 모델에서 물 부족이 식생에 미치는 영향이 연간 총 생산을 감소시킬 만큼 크지는 않았음을 의미한다. Fig. 3에서도 총 강수량이 가장 적었던 1994년의 모의된 연간 GPP의 값은 다른 해와 비교해 크게 감소하지 않았다. 반면에 연평균 온도는 모의된 GPP와 상관성을 보이며 기온이 상승할수록 GPP가 증가하다가 기온이 일정 온도 이상 높아지면 GPP가 감소하는 특성을 보인다(Fig. 4b). 모델에서 기온에 증가함에 따라 GPP가 증가하는 것은 식생의 생장기간이 길어짐에 기인한다. 그러나 일정 온도 이상에서 GPP와 기온의 관계는 기온의 직접적인 영향이라기보다는 생장 기간 동안의 일사량이 GPP 변화의 주 요인으로 작용한데 기인한 것으로 사료된다. 일사량의 경우 총 일사량이 낮은 경우에는 총 일사량과 모의된 GPP와 상관성이 뚜렷하지 않지만 총 일사량이 커질수록 모의된 GPP가 증가하는 경향이 뚜렷이 나타난다(Fig. 4c). 그러므로 조사된 1994년부터 2003년까지 모의된 GPP의 변동성을 설명하는 주된 요인은 기온과 일사량으로 사료된다. 모의된 R_e 의 경우 온도

Fig. 4. Relationship between GPP and (a) precipitation, (b) mean air temperature, and (c) total solar radiation, and relationship between (d) R_e and mean air temperature.

와 뚜렷한 양의 상관성을 보인다(Fig. 4d). 그러므로 모의된 NEE의 연간 변동성은 기온과 일사량의 변동성에 의해 설명되어질 수 있을 것으로 사료되며 이는 우리나라와 같이 총 강수량이 식생 성장에 적절한 곳에서는 기온이 식생 성장의 주요 인자가 된다고 지적한 Suh et al.(2005a)의 연구와 일관된다.

V. 결 론

광릉 활엽수림에서 CLM3.5-DGVM의 탄소교환과정 모의 성능을 평가하기 위하여 모델결과를 광릉지역의 생태 관측값과 문헌값들과 비교 분석하였다. 또한 식물계절학, 식생조성 그리고 기후변동성이 탄소 수지에 미치는 영향을 분석하기 위해서 민감도 실험을 수행하였다.

모의된 평형상태의 탄소저장량은 광릉에서 보고된 값과 유사하였고 식생 조성에서는 침엽수림과 활엽수림이 공존함에도 불구하고 모델에서는 생 기후 제한조건이 성립되지 않아 침엽수림이 모의되지 않았다. 또한 잎의 낙하시기가 한달 이상 늦게 모의됨으로써 생장기간이 과대모의 되는 문제점이 있었다.

모델의 식물계절학 함수를 사용하는 대신 관측된 LAI로부터 유도된 식물계절학 함수를 사용하면 생육기간이 감소함에 따라 총 생산량과 생태 호흡량의 과대 모의는 완화되었지만 광릉에서 보고된 값들과 비교해보면 여전히 큰 값을 가졌으며, 모의된 탄소수지는 생 기후 제한조건에는 유의한 민감도를 보이지 않았다.

기후변동성의 고려 유무에 따른 평형상태의 탄소저장량의 차이는 10%이하로 작아 이 지역에서는 기후변동성이 평형상태의 탄소저장량에 미치는 영향은 유의할 수준이 아니라고 사료된다.

현실적인 탄소수지를 모의하기 위한 CLM3.5-DGVM의 개선방안으로는 식물 계절학의 개선과 또한 식물 조직별 자가영양 호흡량의 비율조정, 분해 낙엽의 대기와 토양으로 배분 비율 조정 등이 필요하다고 사료된다. 향후 연구에서는 탄소 저장량에 대하여 본 연구에서 개선이 필요하다고 제안된 모델 매개변수의 민감도를 조사하고 탄소 저장량의 현실적 모의를 위한 방향을 모색할 예정이다. 또한 모델과 자료 융합(Model data fusion) 방법을 이용하여 모델의 주요 변수들을 최적화시키는 연구를 수행할 계획이다.

적 요

본 연구에서는 광릉의 활엽수림에서 관측된 생태자료들을 이용하여 CLM3.5-DGVM(Community Land Model 3.5-Dynamic Global Vegetation Model)의 탄소교환과정에 대한 모의능력을 평가하고 탄소수지를 계산하였다. 또한 식생 종의 구성과 식물계절학, 그리고 기후 변동성이 탄소수지에 미치는 영향을 조사하기 위하여 민감도 실험을 수행하였다. 모델의 식물계절학은 잎의 출현과 낙하의 시기를 잘 모의하지 못하였으며, 특히 낙엽은 관측보다 한달 이상 지연되어 생장기간을 과대모의 하였다. 모의된 최대 엽면적지수(leaf area index, LAI)는 5.8이며 관측값(4.5)에 비해 과대모의 되었다. 과대 모의된 LAI는 광합성량과 잎의 자가영양호흡의 과대모의를 야기하였으며, 이를 통해 연간 총 일차 생산량(gross primary producing, GPP)과 생태 호흡량(ecosystem respiration, R_e)의 과대모의에 기여하였다. 관측과 모델간의 LAI의 차이에도 불구하고 모의된 식생 탄소 저장량의 크기는 관측 보고된 값과 유사하였다. 모델의 식물계절학함수를 사용하는 대신 관측된 PAI로부터 유도된 식물계절학을 사용하면 생육기간이 감소함에 따라 GPP와 R_e 의 과대 모의는 완화되었다. 하지만 관측 보고된 값과 비교할 때 여전히 큰 값을 보였다. 모의된 탄소수지는 식생 종의 구성에는 유의한 민감도를 가지지 않았다. 모델입력자료에 기후변동성의 고려 유무에 따른 평형상태의 탄소저장량의 차이는 10%이하로 낮았으며 기후변동성이 평형상태의 탄소저장량에 미치는 영향은 유의할 수준이 아니라고 사료된다. 모델에서 모의된 GPP와 R_e 의 1994년부터 2003년간의 연간 변동성은 연 평균 대기온도와 일사량에 의존하였다. 모델의 다른 문제점들에 관해서도 본문에서는 논의되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “기후변화대응종합대책” 프로그램(1600-1637-301-210-13)과 한국연구재단의 A3 Foresight 프로그램의 지원으로 수행되었습니다. 사용된 KoFlux 자료는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(1-8-3)과 국립산림과학원 “지구환경변화에 대응한 장기생태연구”자원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bonan, G. B., S. Levis, S. Sitch, M. Vertenstein, and K. W. Oleson, 2003: A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change Biology* **9**, 1543-1566.
- Collatz, G. J., J. T. Ball, C. Grivet, and J. A. Berry, 1991: Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis, and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology* **54**, 107-136.
- Farquhar, G. D., S. von Caemmerer, and J. A. Berry, 1980: A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* **149**, 78-90.
- Ito, A., I. Motoko, M. Wenhon, L. Misun, K. Hiroshi, S. Nobuko, M. Shohei, and Y. Susumu, 2007: Examination of model-estimated ecosystem respiration using flux measurements from a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in central Japan. *Tellus* **59B**, 616-624.
- Kang, J. H., M. S. Suh, C. H. Kwak, and Y. S. Lee, 2005: Classification of Land Cover over the Korean Peninsula using MODIS Data. *Proceedings of the Autumn Meeting of Korean Meteorological Society*, Korean Meteorological Society, Seoul, 400-401.
- Kwon, H., J. Kim, J. Hong, and J. H. Lim 2010: Influence of the Asian Monsoon on Interannual Variability of Net Ecosystem Carbon Exchange in Two Major Plant Functional Types in Korea. *Biogeosciences* **7**, 1493-1504.
- Lee D. H., J. Kim, S. Kim, S. Moon, J. Lee, J. Lim, Y. Son, S. Kang, S. Kim, K. Kim, N. Woo, B. Lee, and S. Kim, 2007: Lessons from Cross-Scale Studies of Water and Carbon Cycles in the Gwangneung Forest Catchment in a Complex Landscape of Monsoon Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**(2), 149-160.
- Lee, Y. H. and H. Lim, 2009: Evaluation of Modified Soil-Plant-Atmosphere Model (mSPA) to Simulate Net Ecosystem Carbon Exchange Over a Deciduous Forest at Gwangneung in 2006. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(3), 87-99.
- Levis, S., G. B. Bonan, M. Vertenstein, and K. W. Oleson, 2004: The Community Land Model's Dynamic Global Vegetation Model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide. Technical Note NCAR/TN-459+IA, 50pp.
- 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 the Gwangneung Natural Forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), 101-109.
- Min, Y., S. Suh, J. Lee, and J. Lee, 2006: The soil carbon budget in Gwangneung cool-temperate deciduous forest. *Proceedings of the 61th Annual Meeting of Korean Association of Biological Sciences*, 2006P.
- Oleson, K. W., G. Y. Niu, Z. L. Yang, D. M. Lawrence, P. E. Thornton, P. J. Lawrence, R. Stockli, R. E. Dickinson, G. B. Bonan, and S. Levis, 2007: CLM3.5 Documentation, 31pp.
- Oleson, K., Y. Dai, G. Bonan, M. Bosilovich, R. Dickinson, P. Dirmeyer, F. Hoffman, P. Houser, S. Levis, G. Y. Niu, P. Thornton, M. Vertenstein, Z. L. Yang, and X. Zeng, 2004: Technical Description of the Community Land Model (CLM). Technical Note NCAR/TN-461+STR, 173pp.
- Park, S. B., M. S. Kang, J. S. Kim, J. H. Lim, J. H. Chon, S. H. Park, Y. I. Kim, T. H. Hwang, N. Chae, T. J. Choi, S. K. Kang, S. K. Moon, and J. Kim, 2006: The comparison between measured LAI and MODIS LAI in Gwangneung forest watershed. *Proceedings of the autumn meeting of Korean Meteorological Society*, Korean Meteorological Society, Ilsan, 318-319.
- Prentice, I. C., W. Cramer, S. P. Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud, and A. M. Solomon, 1992: A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography* **19**, 117-134.
- Sitch, S., B. Smith, I. C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, M. Sykes, M. Thonicke, and S. Venevsky, 2003: Evaluation of ecosystem dynamics, Plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology* **9**, 161-185.
- Suh, M. S., J. R. Lee, J. H. Kang, D. K. Lee, and M. H. Ahn, 2005a: On the Relationship Between Seasonal Change of Vegetation and Climate Elements in East Asia. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **41**(4), 557-570. (in Korean with English)
- Suh, S. U., Y. K. Min, and J. S. Lee, 2005b: Seasonal Variation of Contribution of Leaf-Litter Decomposition Rate in Soil Respiration in Temperate Deciduous Forest. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1), 57-66.