한국의 두 주요 생태계에 대한 JULES 지면 모형의 민감도 분석: 일차생산량과 생태계 호흡의 모사에 미치는 생물리모수의 영향

장지현¹ · 홍진규² · 변영화³ · 권효정^{1,4} · 채남이⁵ · 임종환⁶ · 김 준^{1,7*}

¹연세대학교 대기과학과 지구환경연구소, ²국가수리과학연구소, ³국립기상연구소 기후연구실,
⁴서울대학교 국가농림기상센터, ⁵한국해양연구원 극지연구소 극지기후연구부, ⁶국립산림과학원 산림보전부,
⁷동경대학교 지속가능한 도시재생 우수연구소/산업과학연구소
(2010년 3월 31일 접수; 2010년 6월 21일 수정; 2010년 6월 24일 수락)

A Sensitivity Analysis of JULES Land Surface Model for Two Major Ecosystems in Korea: Influence of Biophysical Parameters on the Simulation of Gross Primary Productivity and Ecosystem Respiration

Jihyeon Jang¹, Jinkyu Hong², Young-Hwa Byun³, Hyojung Kwon^{1,4}, Namyi Chae⁵,
Jong-Hwan Lim⁶, and Joon Kim^{1,7*}

¹Department of Atmospheric Sciences, Global Environment Laboratory, Yonsei University,
Shinchon-dong 134, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

²National Institute for Mathematical Sciences, Daejeon, 305-340, Korea

³Climate Research Lab, National Institute of Meteorological Research, Korea

⁴National Center for Agro-Meteorology, College of Agriculture and Life Science,
Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

⁵Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute, KORDI
Get-Pearl Tower, 7-50, Songdo-dong, Yeosu-gu, Incheon 406-840, Korea

⁶Department of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute, Seoul, 130-712, Korea

⁷Global Center of Excellence for Sustainable Urban Regeneration, Institute of Industrial Science,
The University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan

(Received March 31, 2010; Revised June 21, 2010; Accepted June 24, 2010)

ABSTRACT

We conducted a sensitivity test of Joint UK Land Environment Simulator (JULES), in which the influence of biophysical parameters on the simulation of gross primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (RE) was investigated for two typical ecosystems in Korea. For this test, we employed the whole-year observation of eddy-covariance fluxes measured in 2006 at two KoFlux sites: (1) a deciduous forest in complex terrain in Gwangneung and (2) a farmland with heterogeneous mosaic patches in Haenam. Our analysis showed that the simulated GPP was most sensitive to the maximum rate of RuBP carboxylation and leaf nitrogen concentration for both ecosystems. RE was sensitive to wood biomass parameter for the deciduous forest in Gwangneung. For the mixed farmland in Haenam, however, RE was most sensitive to the maximum rate of RuBP carboxylation and leaf nitrogen concentration like the simulated GPP. For both sites, the JULES model overestimated both GPP and RE when the default values of input parameters were adopted. Considering the fact that the leaf nitrogen concentration observed at the deciduous forest site was only about 60% of its default value, the significant portion of the model's overestimation can be attributed to such a discrepancy in the input parameters. Our finding demonstrates that the above-mentioned key biophysical parameters of the two ecosystems should be evaluated carefully prior to any simulation and interpretation of ecosystem carbon exchange in Korea.

Key words : JULES, gross primary production, ecosystem respiration, sensitivity analysis, forest, farmland

* Corresponding Author : Joon Kim (joon-kim@yonsei.ac.kr)

I. 서 론

인간의 산업 활동으로 대기 중에 방출된 이산화탄소의 증가로 인한 지구 온난화 문제는 지속가능한 경제 발전과 삶의 질을 위협하는 원인으로 인식되고 있다. 특히 지구 온난화 문제에 대한 국가 차원의 정책을 과학적으로 지원하고 일반인들의 의식 수준을 높이기 위해서는 탄소순환이 일어나는 메커니즘과 기후변화와 의 연관성에 대한 이해가 필수적이다. 이러한 탄소순환과 기후 물리 과정의 상호작용 연구에 사용되는 지면 모형은 지표와 대기 간의 에너지, 물, 탄소 교환량을 모의하고 예측하는 데에 아주 유용한 도구로서, 현재까지 다양한 목적에 활용되어왔다(Sellers *et al.*, 1996; Cramer *et al.*, 1999; Cox *et al.*, 2000; Huntingford *et al.*, 2004; Friedlingstein *et al.*, 2006; Friend *et al.*, 2007; Heimann and Reichstein, 2008; Sitch *et al.*, 2008). 지면 모형이 지표 난류 플럭스 만을 다루던 것에서 벗어나 최근에는 식생의 성장, 경쟁, 소멸 등의 식생 역학 과정을 포함하여 생태계-대기 상호 작용을 보다 현실적으로 수치 모의하게 됨으로써 육상탄소순환의 변화에 따른 기후 변동의 이해와 진단 및 예측 능력을 증대시켰다(Bonan *et al.*, 2003). 그러나 이러한 지면 모형을 통해 다양한 지표-대기 물리 과정의 모시는 가능해졌으나, 한편으로는 식생 역학 과정에 대한 계산 과정이 추가됨에 따라 모형의 수치 적분을 위해 필요한 입력 모수들(parameters)의 개수도 증가하여 입력 모수의 불확실성에 의한 모형결과의 불확실성은 더욱 커지게 되었다.

기존의 지면모형의 모수는 선행 연구에서 제시한 식생 및 토성에 따른 값들로 결정되며, 적분 초기에 처방된 값은 수치 적분 기간 동안 일정하게 유지된다(Sellers *et al.*, 1996; Wilson *et al.*, 1987). 그러나 광합성 관련 모수를 지표-대기 탄소 순환의 장기 모의에 사용할 경우에는 모수의 계절적 변동성을 고려해야 하며(Xu and Baldocchi, 2003), 관측 규모에서 개발된 모수를 격자 규모의 모형에 그대로 적용하는 것은 부적절할 수 있다(Wang *et al.*, 2007). 그리고 동일한 유형의 식생이나 토양이라고 할 지라도 그 지역의 기후 특성에 따라서 모수의 값은 달라질 수 있다. 따라서 이러한 모수의 시공간적 변동성이 고려되지 않는다면 모수의 오차 및 불확실성은 모형의 예측력과 불확실성에 영향을 미칠 수 있다(Knorr and Heimann,

2001; Alton *et al.*, 2007).

이러한 지면모형의 불확실성을 줄이기 위해, 최근 지면 모형과 에디 공분산 방법으로 관측된 플럭스 자료를 연계시키는 모형-자료 융합(Model Data Fusion, MDF)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Fox *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009). 이러한 모형-자료 융합은 (1) 민감도 실험과 불확실성 분석을 통해 모형의 특성을 파악한 뒤, (2) 관측과 모형의 차이가 작아지도록 초기 조건과 모수의 값을 추정하여 (3) 그 값을 검증하고 모형에 적용하는 과정으로 수행된다(Williams *et al.*, 2009).

이 과정에서 모든 모수에 대한 최적의 값을 추정하려면 많은 계산량이 필요하므로 예단변수의 계산에 큰 영향을 미치는 모수들을 선택하여 그 모수들의 값만 조정하는 것이 더욱 효율적이다. 그런 면에서, 모수의 변화가 모형의 결과에 미치는 영향을 파악하는 민감도 실험은 지표-대기 물리과정을 모의하기 위한 주요 모수들을 파악하기에 적절한 작업이다.

또한 민감도 실험은 식생과 토양의 생물리학적 특성이 에너지, 물, 탄소 순환에 미치는 영향을 분석하여 모형을 이해할 수 있는 정보를 제공한다(Alton *et al.*, 2007). 예를 들어, Wilson *et al.*(1987)은 지면 모형인 BATS(Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme)를 다양한 기후 지역에서 10일 동안 수치 적분을 하여 지표 변수들에 대한 민감도 실험을 수행한 결과, BATS가 토성의 선택에 따라 민감하게 반응하였음을 보였다. Pitman *et al.*(1994)은 BATS를 SCM(single column models)에 접합하여 2년 적분 기간 동안 열대 활엽수림, 침엽수림, 초지에서의 민감도를 분석하였다. 그 결과, BATS가 민감하게 반응한 모수는 토성, 뿌리 깊이, 거칠기 길이, 군락 알베도였다. 하지만 이 두 방법은 모수 사이의 상호 작용을 고려하지 못하므로, Henderson-Sellers(1992)는 계승(factorial) 민감도 실험을 설계하여 열대 기후에서 모수의 민감도를 분석하였다. 이 실험을 통해, 거칠기 길이와 군락 단파 알베도 중 하나의 모수만 바뀌거나 두 모수가 모두 달라졌을 때, 미래 기후 예측의 신뢰도가 급격히 감소될 수 있음을 보였다. El Maayar *et al.*(2002)은 IBIS(Integrated Biosphere Simulator)라는 지면 모형의 민감도 실험을 침엽수림 지역에 대해 수행하여, 연평균 에너지, 물, 탄소 플럭스가 토성에 민감하게 반응하며, 특히 탄소 수지는 식생 피복률과 RuBP 카르복실화의

최대 속도의 변화에 의해 큰 비율로 변화함을 보였다. 우리나라에서는 Kim *et al.*(1998)이 일본의 논에서 관측한 에너지 플럭스와 기상 자료로 BATS 모형의 민감도 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 식피율이 지표 부근의 에너지 속의 변화에 매우 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었으나, 이 분석은 사용한 적분 기간이 짧아 사계절의 변화를 겪는 아시아 지역의 기후 조건에 대한 결론을 내리기 어려웠다.

최근 기상청은 차세대 수치 예보 모형으로 영국 기상청 통합 모형(Unified Model, UM모형)을 선정하여 한반도에 대한 모의 능력 평가를 진행 중이다. JULES(Joint UK Land Environment Simulator)는 UM 모형에 접합된 지면 모형의 자립판으로서 지면 모형 MOSES(Met Office Surface Exchange Scheme)에 식생 역학 모형 TRIFFID(Topdown Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics)가 접합되어있는 모형이다(Fig. 1). JULES는 서로 다른 기후대의 활엽수림, 침엽수림에서 모수, 초기조건, 모형 구조에 대한 에너지 및 탄소 플럭스의 민감도 실험이 이미 수행된 바 있다(Alton *et al.*, 2007). 그러나 한반도에서 JULES의 연중 탄소 수치 모의 능력에 대한 분석은 아직 이루어진 바가 없었다. 따라서, 본 연구에서는 JULES의 모의 능력 평가의 일환으로, 한반

도의 주요 식생인 산림과 농경지에서 에디 공분산 방법으로 직접 관측된 장기간의 자료를 사용하여, 1)탄소 수지를 결정하는 총일차생산량(Gross Primary Productivity, GPP)과 생태계 호흡량(Ecosystem Respiration, RE)을 결정짓는 각 생물리 모수들에 대한 민감도를 평가하였으며, 2) JULES의 지표 생태계 탄소 수치 모의 능력을 평가하고 3) 민감도가 높을 것으로 예상되는 주요 모수에 대해 실측 자료를 이용함에 따른 모형의 예측력의 향상 여부를 파악하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측지역

본 연구에서는, JULES의 한반도에서의 생태계 이산화탄소 교환량의 수치 적분 결과를 검증하기 위하여 이산화탄소 교환량을 관측하고 있는 KoFlux(<http://koflux.org>)의 광릉 활엽수림 관측지와 해남 농경지 관측지의 자료를 사용하였다. 경기도 포천시에 위치한 광릉임업시험림의 KoFlux 관측지(37°45'35.37"N, 127°9'11.62"E)는 복잡 지형에 위치한다. 이 지역의 식생은 활엽수림이 우세하고, 우점 수종은 참나무 속인 *Quercus* spp.와 서어나무 속인 *Carpinus* spp.이다. 평균 수고는 약 18m이며, 토성은 양토와 사양토로 이

Fig. 1. Schematic of the carbon cycle in JULES showing the coupling between MOSES and TRIFFID (modified from presentation of Fisher *et al.* (2008)). Soil properties and the climate affect the land surface fluxes of CO₂. The land-atmosphere fluxes are calculated within MOSES at hourly time scales, from 30 to 180 minutes. The resulting rates of net photosynthesis are passed to TRIFFID at monthly time scales. TRIFFID allocates the average net primary productivity (NPP) into growth of the existing vegetation, and to the expansion of the “vegetated area” based on the competition with other plant types. Soil carbon is increased by litterfall from leaf-drop or disturbances, and is returned to the atmosphere by decomposition. After each call to TRIFFID the land surface parameters required by MOSES are updated based on the new vegetation state.

루어져 있다(Lim *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006). 한 반도 남쪽의 전라남도 해남군에 위치한 해남 관측지는 한반도 남쪽(34°33'17.70"N, 126°34'7.11"E)에 위치하며, 이 곳의 지표 피복은 논과 밭이 혼재되어 있다. 토성은 양토와 사양토로 이루어져 있고, 지형은 다소 평평한 편이다(Lee *et al.*, 2003; Hong *et al.*, 2009a).

본 연구에 사용된 KoFlux 관측자료의 시기는 2006년이며 광릉 활엽수림은 연평균기온, 연강수량이 각각 12.4°C, 1625mm로 평년(1971-2000) 기온보다 2.5°C 높은 연평균기온과 평년 강수량보다 약 25% 큰 연강수량이 관측되었다. 2006년 해남 관측지에서는 평년 강수량보다 5% 많은 1439mm의 강수가 내렸으며, 연평균기온은 15.1°C로 평년의 기온보다 2°C 높았다. 광릉과 해남 관측지는 몬순 기후의 영향을 받아 여름 동안의 강수량이 연강수량의 74%와 55%를 차지하였다(Kwon *et al.*, 2009).

2.2. 미기상 관측

본 연구에서는 국내 이산화탄소 관측 네트워크인 KoFlux의 광릉 활엽수림과 해남 농경지에서 2006년에 관측된 이산화탄소 플럭스 및 기상자료를 사용하였다. 생태계와 대기 사이에 교환되는 이산화탄소 교환량은 광릉 활엽수림과 해남 농경지에서 각각 40m와 20m에 설치된 관측 타워에서 에디 공분산 방법으로 관측되었다. 에디 공분산 자료는 10Hz로 집록기에 저장되었으며 자료의 평균 시간은 30분이었다. 플럭스 관측에 관한 보다 자세한 내용은 Hong *et al.*(2008), Kwon *et al.*(2009)과 Kang *et al.*(2009)에서 참고할 수 있다.

전원 공급의 불안정, 기기 수리 및 보정, 품질관리 과정을 통해 플럭스 자료가 결측된 경우에는 Hong *et al.*(2009b)이 제시한 KoFlux의 에디 공분산 자료 처리 표준화 방법으로 결측 자료 메우기를 수행하였다. JULES 자립판 모형 실험에 사용되는 강제력 자료는 관측된 하향 단파 복사, 하향 장파 복사, 강수량, 기압, 비습, 기온, 풍속 자료를 가공하여 사용하였다. 즉, 광릉 기상 자료에 결측이 생긴 경우에는 같은 타워의 20m에서 관측된 자료나 또는 동쪽으로 약 1.2km 떨어진 침엽수림에서 관측된 기상 자료와의 선형 상관관계식을 이용하여 빈 자료를 채웠다. 이 과정을 거친 후에도 결측자료가 있는 경우, 하향 단파 복사는 서울 기상관측소의 자료를 이용하여 빈 곳을 채웠고, 강수량, 기온, 풍속의 결측자료는 기상청에서 제공하는 동

두천의 관측 자료와의 상관관계를 통해 채웠다. 기압(p)은 결측 기간이 짧은 경우 선형 내삽법으로 결측자료를 메웠으며 장기간의 결측이 있는 경우에는 동두천 기상관측소의 자료와의 상관관계로 기압을 추정하였다. 하향 장파 복사($R_{\downarrow}$)는 Ryu *et al.*(2008)이 제시한 식에 근거하여 기온과 기압을 이용하여 계산하였다.

$$R_{\downarrow} = \sigma \epsilon_a T_a^4 \quad (1)$$

여기서 σ 는 Steffan-Boltzmann 상수($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), ϵ_a 는 공기의 방출률(emissivity), T_a 는 기온(K)이다. ϵ_a 를 추정하기 위해 Prata (1996)가 제안한 다음의 식을 사용하였다.

$$\epsilon_a = \left[1 - \left(1 + m \frac{e_a}{T_a} \right) \exp \left\{ - \left(2.3 + m \frac{e_a}{T_a} \right)^{0.5} \right\} \right] \quad (2)$$

여기서 e_a 는 수증기압이며, ϵ_a 의 추정을 위해 사용되는 변수 m 은 전지구적으로 최적화된 값 46.5를 사용하였다. 비습(q)은 타워에서 관측한 수증기압을 다음 식에 대입하여 계산하였다.

$$q = \frac{0.622 e_a / p}{1 - 0.37 e_a / p} \quad (3)$$

2.3. JULES 모형의 개요

JULES는 영국 기상청의 전지구 기후 모형 UM에 접합되어 있는 자립판 지면 모형으로, JULES에서 사용되는 지표 형태는 5개의 식생 기능 유형(활엽수, 침엽수, C3 초지, C4 초지, 관목)과 4개의 비식생유형(도심, 호수, 토양, 빙판)을 포함하여 총 9종류이며, 각 격자 내에 여러 가지 식생 유형이 혼합되어 있다고 가정하는 모자이크 접근 방법을 사용하여 지면의 복잡성을 표현한다. MOSES에서는 30분마다 관측된 기상 자료를 이용하여 매 30분마다 지면-대기 사이에 교환되는 플럭스가 계산되며, 보통 10일 평균된 순일차생산량(Net Primary Productivity, NPP)값이 TRIFFID로 보내져 식물의 각 기관(잎, 뿌리, 가지 등)의 탄소량으로 할당된다. 이 때 각 격자 내의 식생면적이 고려된다. 특히, TRIFFID는 식생 경쟁에서 각 식생 타입의 우열 관계를 가정한 뒤 Lotka-Volterra 미분 방정식을 사용하여 격자 내 식생 면적을 갱신하며, 새싹이 돋아나거나 잎이 떨어지는 것과 같은 식생의 계절적 변동은 기온에 의존하도록 하여 하루 간격으로 갱신된다. 이 과정에 따라 변화된 생물리학적 특성(예,

알베도, 거칠기 길이, 엽면적지수, 평균 수고)과 육상 탄소량은 MOSES에서의 생태계 교환량 계산에 반영된다(Fig. 1). 이와 같은 물리과정을 통해 JULES의 예단 변수가 모의되며, 식생 기능 형태와 토양의 특성에 의해 처방된 75개의 모수가 이용된다.

2.3.1. 총일차생산량(Gross Primary Production, GPP)

본 연구에서 민감도 분석에 사용한 총일차생산량은 다음의 세 식을 통해 계산된 세 개의 미지수 A_p (수분 스트레스를 받지 않은 순광합성량), g_s (기공 전도도), C_i (잎 내부의 이산화탄소 분압)에 의해 모의된다.

$$A_p = \frac{g_s}{1.6RT_s}(c_c - c_i) \quad (4)$$

$$\left(\frac{c_i - \Gamma}{c_c - \Gamma}\right) = f_0 \left(1 - \frac{D_s}{D_c}\right) \quad (5)$$

$$A_p = A_p(\vec{X}, c_i) \quad (6)$$

여기서 R 은 기체 상수, T_s 는 잎 표면 온도, C_c 는 잎 표면의 이산화탄소 분압, Γ 는 보상점, D_s 는 잎 표면에서의 포차, f_0 는 잎 내부 탄소 농도와 포차의 관계식에 사용되는 상수, D_c 는 기공이 닫힐 때의 포차, $\vec{X}$ 는 기상 변수로 이루어진 벡터이다. 식 (4)는 잎의 기공을 통해 교환되는 수증기와 이산화탄소의 관계식, 식 (5)는 포차와 이산화탄소 분압, 그리고 기공의 개폐와의 관계식(Jacobs, 1994), 식 (6)은 기상 및 생물리학적 조건과 광합성량의 관계식을 나타낸다(Collatz *et al.*, 1991; Collatz *et al.*, 1992; Cox *et al.*, 1999). 식 (6)은 세 개의 제한 요소 중 가장 부족한 요인이 광합성량을 결정짓는 최소의 법칙에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$W = \min\{W_c, W_p, W_e\} \quad (7)$$

$$W_c = V_m \left\{ \frac{c_i - \Gamma}{c_i + K_c(1 + O_a/K_o)} \right\} \quad (8)$$

$$W_p = \alpha(1 - \omega)I_{par} \left\{ \frac{c_i - \Gamma}{c_i + 2\Gamma} \right\} \quad (9)$$

$$W_e = 0.5 V_m \quad (10)$$

여기서 W 는 실 총광합성량, W_c 는 RuBP 카르복실화의 최대 속도가 제한된 경우의 총광합성량, V_m 은 RuBP 카르복실화의 속도, K_c 와 K_o 는 CO_2 와 O_2 의 Michaelis-Menten 상수, O_a 는 대기 중 산소 분압,

W_p 는 빛의 제한을 받은 총광합성량, α 는 광효율, ω 는 광합성 유효 복사량의 산란 계수, I_{par} 는 광합성 유효 복사 입사량, W_e 는 광합성 산물의 이동에 제한을 받는 총광합성량이다. 식 (7)과 같이 W_c , W_p , W_e 의 최소값이 사용되기도 하지만, 실제 자연 현상에서는 W_c , W_p , W_e 사이의 변화가 점진적으로 발생한다. 이를 고려하기 위해, 식 (7) 대신 다음의 이차방정식을 도입하여 실제 현상에 가까운 총광합성량을 모의한다.

$$\beta_1 W_p^2 - W_p\{W_c + W_l\} + W_c W_l = 0 \quad (11)$$

$$\beta_2 W^2 - W\{W_p + W_e\} + W_p W_e = 0 \quad (12)$$

W_p 는 W_c 와 W_l 사이의 점진적 최소값, W 는 W_p 와 W_l 사이의 점진적 최소값이며, 각각의 제한 요소들을 고려하는 정도에 따라 β_1 , β_2 가 결정된다. JULES는 $\beta_1=0.83$, $\beta_2=0.93$ 을 사용하고 있다. 마지막으로, 잎 규모의 순광합성량 A_p 는 총광합성량과 암호흡량(R_d)의 차이로부터 다음과 같이 표현된다.

$$A_p = W - R_d \quad (13)$$

토양수분은 식물의 뿌리를 통해 흡수되어 기공의 개폐에 영향을 미치므로, 토양수분이 부족하면 광합성은 제한을 받게 된다. JULES는 토양수분에 의한 스트레스를 무차원 변수 β 로 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{for } \theta > \theta_c \\ \frac{\theta - \theta_w}{\theta_c - \theta_w} & \text{for } \theta_w < \theta < \theta_c \\ 0 & \text{for } \theta \leq \theta_w \end{cases} \quad (14)$$

여기서 θ 는 토양수분량이고, θ_w 는 위조점(토양수분 스트레스로 광합성이 멈추는 토양수분량), θ_c 는 임계점(토양수분 스트레스로 광합성에 제한을 받기 시작하는 토양수분량)으로 토성에 따라 처방된 값을 사용한다. 토양 수분량이 θ_c 보다 크면 수분 스트레스를 받지 않고, θ_w 보다 작으면 광합성은 일어나지 않는다. 이러한 수분 스트레스가 광합성에 미치는 영향은 β 와의 직접적인 상관관계를 가정하여 다음과 같이 표현된다.

$$A = A_p \beta \quad (15)$$

여기서 A 는 잎의 순광합성량이다.

잎 규모의 광합성량은 식 (4)-(15)에 소개한 광합성

모형에서 10개의 군락 층에서 계산한 뒤, 각각의 층을 양지층과 음지층으로 분류하여 엽면적지수에 따라 군락 규모로 규모 확장되어 GPP를 모의한다.

$$A_{canopy} = A_{sun}L_{sun} + A_{shade}L_{shade} \quad (16)$$

$$GPP = 0.012 \{A_c + R_{dc}\beta\} \quad (17)$$

여기서 A_{canopy} 는 군락의 순광합성량, A_{sun} 과 L_{sun} 은 각각 양지층의 순광합성량과 엽면적지수이며, A_{shade} 와 L_{shade} 는 음지층의 순광합성량과 엽면적지수, R_{dc} 는 군락의 암호흡량이다.

군락 규모의 광합성량 모의에 사용되는 엽면적지수는 TRIFFID에서 갱신된다. MOSES에서 군락의 순광합성량으로부터 모의된 NPP는 잎, 목질부, 뿌리의 탄소로 할당된다. 우선 엽면적지수를 갱신한 뒤, 각각의 탄소량과 엽면적지수와의 관계로 가정된 식을 통해서 다음과 같이 탄소량이 할당된다.

$$L = \sigma_l L_b \quad (18)$$

$$R = L \quad (19)$$

$$W = a_w L_b^{b_{wl}} \quad (20)$$

여기서 L 은 잎 탄소량, R 은 뿌리 탄소량, W 은 목질부 탄소량, L_b 는 엽면적지수의 최대값이며, σ_l , a_w , b_{wl} 은 엽면적지수와 탄소량의 관계를 나타내는 상수이다. 이 때, 대기의 온도가 주어진 t_{leaf_of} 의 값보다 낮아지면, 낙엽/낙지량이 생기고 엽면적지수가 감소하도록 모의되며, 이에 따라 GPP가 감소한다. 낙엽/낙지량은 토양 탄소량을 증가시키며, 토양 탄소량은 2.3.2 장에 소개된 토양호흡의 모의에 사용된다.

2.3.2. 생태계 호흡량(Ecosystem Respiration, RE)

JULES에서 생태계 호흡량(RE)은 식물의 성장호흡량(R_{pg})과 유지호흡량(R_{pm}), 그리고 토양내 미생물 호흡량(R_s)의 합으로 계산되며(Cox et al., 2001), 각 호흡량은 다음의 식으로 표현된다.

$$R_{pm} = 0.012 R_{dc} \left\{ \beta + \frac{(N_r + N_s)}{N_l} \right\} \\ = \begin{cases} 0.012 \{ 0.015 V_{max} f_T(2.0) \} \left\{ \beta + \frac{(N_r + N_s)}{N_l} \right\} & \text{for } C_3 \text{ plants} \\ 0.012 \{ 0.025 V_{max} f_T(2.0) \} \left\{ \beta + \frac{(N_r + N_s)}{N_l} \right\} & \text{for } C_4 \text{ plants} \end{cases} \quad (21)$$

$$R_{pg} = r_g \{ GPP - R_{pm} \} \quad (22)$$

$$R_s = \kappa_s C_s f_\theta f_T \quad (23)$$

여기서 N_l , N_s , N_r 은 잎, 가지, 뿌리의 질소량, V_{max} 는 온도의 영향이 고려되지 않은 RuBP 카르복실화의 최대 속도로 잎 질소 농도에 비례하는 값이며, f_T 는 10°C 상승함에 따른 생태 호흡량의 변화율(Q10)과 온도의 의존관계를 나타내는 함수인 $f_T = q_{10}^{0.1(T_s - 25)}$ 로 표현된다. 그리고 R_{pg} 를 나타내는 식 (22)의 r_g 는 순 일차생산량에 대한 성장호흡량의 비율을 나타내는 상수이며, R_s 를 나타내는 식 (23)의 κ_s 는 25°C에서의 토양내 미생물 호흡량, C_s 는 토양탄소량, f_θ 는 토양수분의 함수이다. 이를 통해, 유지호흡과 성장호흡으로 이루어진 식물호흡은 광합성과 관련이 있으며 토양내 미생물 호흡량은 광합성과 관계없이 토양의 탄소량, 온도 및 수분 조건에 의해 결정됨을 알 수 있다. 한 가지 유의해야 할 것은 실제 관측에서는 직접 관측된 순생태계교환량(net ecosystem exchange, NEE)로부터 GPP와 RE를 경험적으로 계산하는 반면, 모형에서는 GPP와 RE를 광합성 모형과 토양 온도의 함수로 독립적으로 계산한 뒤, 두 값의 차이로 NEE를 계산한다는 점이다.

2.4. 민감도 실험 설계

본 연구에서 수행된 민감도 실험은, 모형에서 사용하고 있는 모수 및 예단변수 초기 조건의 기존 설정값(default values; Table 1)만을 이용하여 계산된 생태계 탄소 교환량(예, GPP, RE)의 연적산값과 각 모수의 값에 변화를 주어 계산된 생태계 탄소 교환량의 연적산값의 차이를 통해 민감도를 파악하는 One-at-a-Time(OAT) 방법을 이용하여 수행되었다(Wilson et al., 1987; Pitman, 1994; Kim et al., 1998; El Maayar et al., 2002). 이 방법은 모수들 사이의 상호작용을 고려하지 못한다는 단점이 지적된 바 있지만(Henderson-Sellers, 1992; Bastidas et al., 1999; Liu et al., 2004), 생태계 탄소 교환량의 수치 모의에 주요한 영향을 미치는 모수를 간단하게 찾을 수 있다는 장점을 갖는다.

생태계 탄소 교환량의 민감도(sensitivity, Δ)는 다른 모수들을 기존 설정값으로 유지시킨 상태에서 하나의 모수를 10%, 20%, 30% 변화시켰을 때 계산된 생태계 탄소 교환량의 연적산값과 본래 모수의 기존값만을 이용하여 구한 생태계 탄소 교환량의 연적산값 차이의

Table 1. Default values of influential parameters and initial conditions of important prognostic variables (BL: Boardleaf forest, C3G: C3 grass)

Vegetation parameters		Plant Functional Type	
Parameters	Description	BL	C3G
a_{wl}	Allometric coefficient relating the target woody biomass to LAI (kg C/m^2)	0.65	0.005
a_{ws}	Woody biomass as a multiple of live stem biomass	10	1
b_{wl}	Allometric exponent relating the target woody biomass LAI	1.667	1.667
η_{sl}	Live stemwood coefficient ($\text{kg C m}^{-1} \text{LAI}^{-1}$)	0.01	0.01
sigl	Specific density of leaf carbon ($\text{kg C/m}^2 \text{leaf}$)	0.0375	0.025
tleaf_of	Temperature below which leaves are dropped (K)	273.1	258.1
lai_max	Maximum projected LAI	9	4
lai_min	Minimum projected LAI	3	1
$\alpha(\alpha)$	Quantum efficiency ($\text{mol CO}_2/\text{mol PAR photons}$)	0.08	0.08
d_{qcrit}	Critical humidity deficit ($\text{kg H}_2\text{O/kg air}$)	0.09	0.1
f_0	c/c_a for $D = 0$	0.875	0.9
f_d	Dark respiration coefficient	0.015	0.015
n_{eff}	Constant relating V_{max} and leaf nitrogen ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	0.0008	0.0008
n_{l0}	leaf nitrogen concentration	0.04	0.06
Miscellaneous surface, carbon, and vegetation parameters			
Parameters	Description	Values	
$\beta_1(\beta_1)$	Coupling coefficient for co-limitation in photosynthesis model	0.83	
$\beta_2(\beta_2)$	Coupling coefficient for co-limitation in photosynthesis model	0.93	
q_{10_leaf}	Q_{10} factor for plant respiration	2	
$\kappa_s(\kappa_s)$	Specific soil respiration rate at 25°C and optimum soil moisture (s^{-1})	5×10^{-9}	
co2_mmr	Concentration of atmospheric CO_2 , expressed as a mixing ratio	5.42×10^{-4}	
Prognostic parameters		Initial Conditions	
Variables	Description	Value	
C_s	Soil carbon (kg m^{-2})	12.10	
Variables	Description	BL	C3G
frac	the fraction of land area of each gridbox that is covered by each surface type.	0.9	0.92
lai	leaf area index of each plant functional type	0.1	1
canht_ft	height (m) of each plant functional type	20	0.79

백분율 변화로 정의하였다. 온도 변수 중 절대온도를 사용하는 경우에는 10%, 20%, 30%의 변화를 주는 대신 1°C , 2°C , 3°C 의 변화에 대한 민감도를 계산하였다.

$$\Delta = \left(\frac{PERT - CTL}{CTL} \right) \times 100\% \quad (24)$$

여기서 PERT는 단일 모수를 변화시켜 계산한 생태계 탄소 교환량의 연적산값이며 CTL은 모수의 기존 설정값을 통해 계산된 생태계 탄소 교환량의 연적산값이다. 본 연구에서는 JULES의 수치 모사에 필요한 75개의 모수와 9개의 예단변수의 초기값들을 각각 10, 20, 30%씩 증가 또는 감소시켜가면서 모형 결과의 차이를 분석하여 수치 모사된 GPP와 RE에 가장 큰 영

향을 주는 10개의 모수를 파악하였다. 여기서, 쉽게 변하지 않는 식생 형태 및 토양의 물리적 성질에 관련된 모수들, 그리고 초기 조건 중 현실적으로 불가능한 값을 갖는 경우는 계산 결과를 논의에 포함시키지 않았다.

III. 결 과

3.1. 민감도 분석

Fig. 2는 광릉 활엽수림에서 JULES의 모수들에 대한 GPP와 RE의 민감도 실험의 결과로서, GPP와 RE의 모의에 가장 큰 영향을 미치는 10개의 모수를 보여준다. GPP는 잎 질소농도와 RuBP 카르복실화의

Fig. 2. Percentage change of the annual GPP and RE by changing the parameters by 10, 20 and 30% at the GDK site. Ten most influential parameters on GPP and RE are shown.

최대 속도(V_{max})의 비율(neff), 잎 질소 농도(nl0), 대기 중 이산화탄소 농도(co2_mmr), 목질부 탄소량과 엽면적지수의 관계에 사용되는 상수(b_{wl}), 호흡이 일어나는 목질부의 탄소량과 목질부의 총탄소량의 관계에 사용되는 상수(a_{ws}), 평균 수고(canht_ft), 호흡이 일어나는 목질부의 탄소량과 엽면적지수의 관계에 사용되는 상수(eta_sl), f_0 , 목질부 탄소량과 엽면적지수의 관계에 사용되는 상수(a_{wl}), α (alpha)의 순서로 민감도가 높았다. 민감도가 높은 모수의 대부분은 잎 규모의 광합성량을 계산할 때 직접적으로 사용되는 모수들이었다.

RE는 b_{wl} , canht_ft, a_{ws} , eta_sl, a_{wl} , nl0, neff, f_0 , Cs, 25°C에서 토양내 미생물 호흡률(κ_s : kaps)의 순서로 각 모수의 변화에 대해 민감한 반응을 보였다 (Fig. 2). 광합성은 식물의 잎에서만 일어나지만 식물의 호흡은 식생의 잎, 목질부, 뿌리에 해당하는 모든 생물량(biomass)에서 일어나므로, RE는 전체 생물량과 관련된 모수들(b_{wl} , canht_ft, a_{ws} , eta_sl, a_{wl})에 대해 민감도가 크게 나타났다.

Fig. 3은 해남 농경지에서 수치 모의한 탄소 플럭스의 모수에 대한 민감도 실험의 결과이다. 이 관측지에서의 GPP는 nl0, neff, co2_mmr, alpha, β_2 (beta2),

β_1 (beta1), 최대 엽면적지수(lai_max), f_0 , 잎의 Q10값(q10_leaf), C3 초지에서 광합성 산물의 이동에 제한을 받는 경우의 광합성량의 계산에 사용되는 상수(few_c3)의 순서로 영향을 받았으며, RE는 nl0, neff, lai_max, co2_mmr, kaps, alpha, 암호흡량의 모의 상수(fd), Cs, q10_leaf, beta2의 순서로 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 활엽수림에서 GPP가 nl0의 변화에 가장 민감했던 것과 마찬가지로, 농경지에서의 GPP도 nl0의 변화에 가장 민감했다. 농경지에서 RE에 가장 중요한 영향을 미치는 모수 역시 잎 질소 농도로 나타났으며, 활엽수림에서 GPP와 RE가 민감하게 반응했던 모수들 중 목질부와 관련된 모수들은 농경지의 탄소 플럭스 모의에 큰 영향을 미치지 않았다. 이것은 활엽수림이 목질부로 인해 큰 생물량을 갖지만 농작물은 산림의 목질부와 달리 생물량이 매우 작기 때문으로 추정된다.

활엽수림과 농경지 모두에서 GPP와 RE가 가장 두드러진 민감도를 보였던 잎 질소 농도(nl0), 그리고 nl0와 V_{max} 의 비율인 neff는 잎 규모의 광합성 계산에서 효소와 관계된 제한요소에 영향을 미친다. JULES의 민감도 실험을 수행한 Alton *et al.*(2007)도 V_{max}

Fig. 3. Percentage change of the annual GPP and RE by changing the parameters by 10, 20 and 30% at the HFK site. Ten most influential parameters on GPP and RE are shown.

에 대한 GPP의 높은 민감도를 지적하였으며, $V_{\max}$ 는 잎 질소 농도와 선형적 관계를 갖는다는 가정을 통해 계산되므로 잎 질소 농도 관측의 필요성을 강조하였다. 한편, Alton *et al.*(2007)은 $V_{\max}$ 와 더불어 alpha에 대한 GPP의 민감도가 높다는 결과를 제시하였다. alpha는 흡수된 하향 단파 복사량 중에서 광합성에 사용되는 복사량의 비율로서, 빛에 제한이 있을 경우의 광합성량을 계산하는 데 사용되는 모수이다. $V_{\max}$ 와 alpha로부터 계산된 광합성량 중 더 작은 값이 실제 광합성량으로 간주되기 때문에 두 모수는 광합성량의 결정에 매우 중요하다. 또한, JULES는 식생의 호흡이 암호흡량에 비례하며, 암호흡은 잎 질소 농도(nl0)에 비례하는 $V_{\max}$ 와 선형 관계에 있다는 가정을 사용하고 있다. 따라서 nl0, neff도 생태계 호흡량을 결정하는 주요 모수로 작용함을 알 수 있다.

활엽수림과 농경지의 GPP와 RE가 큰 민감도를 보이는 대기 중의 CO_2 의 농도는 계절 변동을 함에도 불구하고 현재 모형의 구조는 일정한 상수값을 사용하도록 하고 있다. 그러나 지표-대기 탄소 순환의 장기 모의를 하는 경우에 모수의 계절 변동을 고려하면 보다 현실적인 탄소 플럭스를 예측할 수 있기 때문에(Xu

and Baldocchi, 2003), 대기 중 CO_2 농도의 시간 변화가 모형의 수치 모사에 반영되도록 모형을 수정하고 그 효과를 정량화하는 것이 필요하다.

활엽수림의 RE에 대해 가장 큰 영향을 미쳤던 b_{wl} 은 생물량과 엽면적지수의 관계에 사용된다(식 (20)). JULES는 식 (18-20)의 관계를 통해 생물량, 엽면적지수, 평균 수고의 관계를 결정하는 여러 가지 경험식들을 사용한다. 엽면적지수와 평균 수고는 잎 규모의 탄소 순환을 군락 규모로 규모 확장시키는 데 중요한 역할을 하기 때문에, 식 (20)에서 지수로 사용된 b_{wl} 값의 작은 변화가 GPP와 RE에 큰 변화를 야기할 수 있다. 이와 마찬가지로, a_{ws} 와 η_{sl} , a_{wl} 도 엽면적지수와 생물량의 관계를 결정짓는 모수로서 엽면적지수의 변화에 영향을 미치기 때문에 GPP와 RE의 모의에도 큰 영향을 주게 된다.

활엽수림의 GPP와 RE가 높은 민감도를 보였던 f_0 는 c_i/c_s 에 비례하며 기공의 개폐와 관련 있는 모수로서, JULES에서는 활엽수림의 경우 0.875, 농경지의 경우 0.8을 설정값으로 사용하고 있지만, 이 모수는 0.61~0.84의 범위에서 보정이 가능한 모수이며(Jacobs, 1994; Cox *et al.*, 2003; Cox *et al.*, 1998), 따라서

한반도 생태계의 식생 기능 형태 및 토양 특성에 따라 조절해 주는 것이 바람직하다.

농경지에서 GPP의 모의에 주요한 모수로 확인된 β_{a1} , β_{a2} 는 0과 1 사이의 값을 사용할 수 있으며, Sellers *et al.*(1992)과 Collatz *et al.*(1991)은 0.8과 1.0 사이의 값을 사용하였다. 본 실험에서는 β_{a1} , β_{a2} 를 0.58-1.0의 범위에서 변화시켜가며 그에 따른 GPP와 RE의 민감도를 살펴 보았다. 그러나 이 모수들은 JULES에서 사용되는 모수들 중 가장 민감도가 높은 10개의 모수에 포함됨에도 불구하고, 값의 결정 방법에 대해서는 알려진 바가 적다. 따라서 세밀한 문헌 조사 및 관련 연구가 요구된다.

농경지에서의 GPP와 RE의 모의에 주요한 영향을 미쳤던 q_{10_leaf} 는 탄소 수지와 온도의 상관관계를 나타내는 상수로서, 전지구 적분을 할 경우에는 2.0을 사용하고 있다. 그러나 g_{10_leaf} 를 1.4에서 2.6으로 변화시키자 농경지의 GPP가 약 -4~8% 변화하였으며 RE는 약 -5~9% 정도 변했다(Fig. 3). 그러므로 전지구 적분의 경우에는 q_{10_leaf} 의 값으로 2.0의 사용이 타당한 것으로 보이나(Cox *et al.*, 2001), 정점 적분이나 지역 규모의 적분을 할 때에는 그 지역 및 식생의 특징을 고려하거나 관측값에 근거한 q_{10_leaf} 값을 사용하는 것이 적절할 것이다.

한편, 활엽수림과 농경지의 RE의 모의에 중요한 모수인 C_s 와 k_{aps} 는 식 (23)과 같이 토양호흡량의 계산에 사용된다. 특히 산림에서의 토양호흡은 생태계 호흡의 약 70%를 차지하는 가장 큰 발원이므로(예, Janssens *et al.*, 2001), 토양호흡의 모의에 사용되는 모수들은 생태계 호흡량의 모의에 중요한 영향을 미친다.

El Mayaar *et al.*(2002)에 의해 수행된 IBIS 지면 모형의 모수 및 초기 조건에 대한 민감도 실험에 의하면, 엽면적지수가 -20~20%로 변함에 따라 NEE는 -12~6%의 민감도로 차이를 보였다. 그러나 본 연구에서는 엽면적지수의 초기값을 $\pm 30\%$ 까지 변화시켰음에도 불구하고 GPP, RE의 민감도는 1% 이하로 작았다. 이러한 이유는 엽면적지수의 초기값에 변화를 주더라도, 스핀업 과정을 거친 후 거의 비슷한 엽면적지수의 초기값이 만들어지기 때문이다. 그로 인해, 엽면적지수의 갱신에 사용되는 생물량과 관련된 모수(예, b_{w1})에 대한 민감도가 엽면적지수의 초기값에 대한 민감도에 비해 훨씬 크게 나타나는 것이다.

3.2. JULES 모형의 결과 분석

직접 관측된 기상장으로부터 JULES 모형의 강제력 실험을 수행하여 탄소 순환의 주요한 과정인 GPP, RE, NEE를 모의하였으며 그 결과를 에디공분산 방법으로 직접 실측한 플럭스값과 비교하였다. 이 때 비교에 사용된 모형의 결과는 식생 기능 형태와 토양의 종류에 따라 처방된 모수들의 기존 설정값을 사용하여

Fig. 4. The simulated and observed GPP, RE and NEE at the GDK site.

Fig. 5. The simulated and observed GPP, RE and NEE at the HFK site.

Fig. 6. Comparison of observed daily budgets of NEE, GPP, and RE with JULES simulations: (a, b, c) for the GDK site and (d, e, f) for the HFK site. Default represents the simulated carbon exchanges with default values of parameters. PARAM represents the simulated carbon budgets with the observed values of some parameters.

적분하였다.

기본 설정값을 사용하여 수치 모사를 시도한 결과 JULES로 수치 모의된 GPP와 RE결과가 관측값에 비해 모두 과대평가하고 있음을 알 수 있다(Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6). 이러한 차이는 관측자료처리에 의한

불확실성으로 보기에는 그 정도가 크다. Hong *et al.*(2009b)에 의하면, 서로 다른 자료 처리 방법에 의해 발생할 수 있는 연간 GPP의 불확실성은 약 50gC m^{-2} 로서 연간 적산량 1050gC m^{-2} 에 비교했을 때 매우 작은 양이다. 따라서 이를 감안할 때 주어진 모수들의 기본 설정값으로부터 계산된 모형의 GPP가 과대평가되었음이 명백하다(Table 2). 과다모의의 정도를 보다 정량적으로 파악하기 위해 광릉 활엽수림과 해남 농경지 관측지에서의 RMSD(root mean square deviations)를 계산하였다. 광릉 활엽수림에서 NEE, GPP, RE의 RMSD는 1.15, 4.19, 4.14였으며, 해남 농경지에서의 NEE, GPP, RE의 RMSD는 2.41, 8.32, 7.81이었다. 따라서 해남 농경지에 대해 모의한 탄소 플럭스의 과다모의의 정도가 활엽수림보다 크다는 것을 알 수 있다.

JULES로 모의한 NEE, GPP, RE가 관측값의 시간 변화를 모의해낼 수 있는지를 파악하기 위해 관측값과 모의 결과의 상관계수(r)를 살펴 보았다(Table 2). 광릉 관측지의 NEE, GPP, RE의 상관계수는 0.41, 0.90, 0.84였으며, 해남의 경우에는 각각 -0.15, 0.60, 0.72이었다. 즉, 활엽수림의 모의 결과와 비교했을 때, 해남 농경지에 대해 수치 모의된 탄소 플럭스의 패턴은 관측된 패턴과 더 많이 달랐으며, NEE의 경우는 모형에서 그 시간적 변화를 거의 모의하지 못하고 있었다. 이러한 차이는 JULES가 농경지의 식생 타입을 C3 초지로 간주하고 있고 인간에 의해 관리되는 모내기, 관개, 이모작, 추수 등의 영향을 전혀 고려하지 못하기 때문에 발생하는 것으로 추정된다(Cox *et al.*, 1998; Vetter *et al.*, 2008; Kwon *et al.*, 2010).

일반적으로 모형의 오차는 모수의 내정값이 관측지

Table 2. Observed and modeled annual budgets, root mean square deviations (RMSD), and correlation coefficients (r) of net ecosystem exchange (NEE), gross primary production (GPP), and ecosystem respiration (RE) for the GDK and the HFK sites. Default represents the simulated carbon exchanges with default values of parameters. PARAM represents the simulated carbon budgets with the observed values of some parameters

		GDK			HFK		
		NEE	GPP	RE	NEE	GPP	RE
Annual Sum	Observed	-73	1020	947	-10	1003	993
	Default	213	1238	1451	-252	2715	2463
	PARAM	255	864	1119			
RMSD	Default	1.15	4.19	4.14	2.41	8.32	7.81
	PARAM	0.85	2.78	2.97			
r	Default	0.41	0.90	0.84	-0.15	0.60	0.72
	PARAM	0.21	0.90	0.84			

Table 3. Comparison between default values of parameters in JULES and observed values for broadleaf forest (BL)

Parameters	Unit	JULES (BL)	Observed Value	Year of Observation	References
n10	kg N (kg C) ⁻¹	0.040	0.023	2003, 2005	Chae <i>et al.</i> (2009)
κ_s	s ⁻¹	5×10^{-9}	4.6×10^{-9}	2004	Chae <i>et al.</i> (2008)
Cs	kg C m ⁻²	12.01	9.76	2003	Lim <i>et al.</i> (2003)

Fig. 7. The observed and simulated GPP, RE and NEE with modified parameters by the observation at the GDK site.

의 특성을 반영하지 못하거나 모형 내부의 물리과정의 구조적 문제, 입력변수로 사용된 강제력 자료의 관측의 불확실성 때문에 발생할 수 있다. 앞의 민감도 실험에서 결과에 큰 영향을 미치는 몇 가지 모수들의 값과 기존의 연구들을 통해서 광릉 관측지에서 보고된 값들을 비교해보면 그러한 차이를 확인할 수 있었다 (Table 3). 따라서 아의 실험 결과를 근거로 기존 설정값들을 관측에 근거한 값으로 바꾸었을 때 JULES 모형의 결과가 얼마나 현실적이 되는지를 분석해보았다.

관측으로 파악할 수 있는 모수의 값들을 적용하였을 때, NEE의 상관계수는 감소하였으며, GPP, RE에 대한 상관계수는 일정하였다 (Table 2, Fig. 7). 이는 모수의 값에 관측값을 적용하였을 때 GPP와 RE의 변화량이 달라서 GPP와 RE의 차이로부터 계산되는 NEE의 양과 시간 변화가 보다 민감하게 반응하기 때문이다. 그러나 관측값을 적용하여 모의한 NEE, GPP, RE의 RMSD가 줄어들었으며 GPP와 RE의 오

차가 218, 504 gC m⁻² yr⁻¹에서 -156, 172 gC m⁻² yr⁻¹로 감소하였으며, 이는 특히 산림과 농경지의 GPP와 RE의 수치 모사가 민감하게 반응했던 n10의 기존 JULES 설정값이 실제 관측값의 약 1.7배나 컸기 때문인 것으로 보인다. 따라서 실제 생태계의 생물리학적 특성을 모형에 적용하는 것이 중요함을 알 수 있다.

IV. 요 약

본 연구에서는 JULES의 민감도 실험을 통해서 산림과 농경지에서 탄소 수지의 수치 모의에 큰 영향을 주는 주요 모수들을 파악하였으며, 탄소 수지 성분에 따라 민감한 모수가 두 생태계에서 다소 다르게 나타났다. 즉, 한반도 활엽수림과 농경지에서 수치 모사된 GPP는 두 생태계 모두 RuBP 카르복실화의 최대 속도의 비율, 잎 질소 농도와 같이 대부분 식생의 광합성량을 계산할 때 직접적으로 필요한 모수들에 민감하게 반응하였다. RE의 경우 활엽수림에서는 LAI와 나무의 질량을 연결시켜주는 모수 및 군락 높이에 민감한 반면, 농경지에서는 RE에 가장 중요한 영향을 미치는 모수는 GPP와 같이 잎 질소 농도로 나타났다. 이는 활엽수림이 농경지에 비해서 훨씬 큰 생물량을 가지기 때문이며, 이로 인하여 활엽수림에서 GPP와 RE가 민감하게 반응했던 모수들 중 목질부와 관련된 모수들은 농경지의 탄소 플럭스 모의에 큰 영향을 미치지 못했다.

이러한 모수들이 탄소 순환량의 모의에 민감하게 작용함에도 불구하고, 실제 관측값이 보고된 몇몇 모수를 비교한 결과 모형의 기존 설정값과 차이를 보이는 경우가 있었다. 특히, GPP와 RE의 모의에 큰 영향을 미쳤던 잎 질소 농도의 경우, 모형의 기존 설정값은 관측값보다 두 배 이상 컸다. 따라서, JULES의 탄소 순환 모의 능력을 향상시키기 위해서는 주요 모수들에 대한 정보의 파악이 중요하며, 선행 연구가 이루어지지 않은 모수들에 대해서는 관측을 통해 기존 설정값

을 검증해야 할 것이다. 관측이 불가능한 모수의 경우에는 직접적으로 모수의 값을 파악할 수는 없지만 플럭스 관측 자료를 이용한 모형-자료 혼합과정에서 모수의 기존 설정값을 보정할 수 있을 것이다. 이러한 과정을 통해 한반도의 생물리학적 정보가 JULES에 반영됨으로써 모형의 탄소 순환 모의 능력을 향상시킬 수 있을 것이다.

적 요

본 연구에서는 한반도의 주요 생태계인 활엽수림과 농경지에서 지면 모형 JULES(Joint UK Land Environment Simulator)으로 모의한 총일차생산량(Gross Primary Productivity: GPP)과 생태계 호흡량(ecosystem respiration: RE)의 수치 모사 결과에 영향을 미치는 주요 모수를 파악하였으며, 민감한 모수에 대해 실측자료를 사용함에 따른 모형 예측력의 개선 정도를 평가하였다. 민감도 실험의 결과, 활엽수림과 농경지에서 모두 JULES로 모의한 GPP는 잎 내부의 질소 농도와 리불로오스이인산(RuBP) 카르복실화의 최대 속도에 가장 민감하였다. RE는 활엽수림에서는 목질부 탄소량과 엽면적지수를 연결시켜주는 상수에 가장 민감하였다. 반면에 농경지에서 수치모사된 RE는 GPP와 같이 각각 잎 내부의 질소 농도와 RuBP 카르복실화의 최대 속도에 가장 민감하였다. JULES로부터 제공된 모수의 값으로 모의된 두 지역의 GPP와 RE는 모두 관측값에 비해 과대평가되었다. 특히 활엽수림에서 GPP가 가장 민감하게 반응했던 잎 질소 농도의 실제 관측값이 모형에서 사용하는 기존 설정값의 50% 이하임을 고려할 때 모형에서 설정된 모수의 값으로 탄소 순환을 수치 모사할 경우에 모수의 기존 설정값과 실제값의 차이가 모형의 과다모의에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 따라서 한반도 탄소순환의 현실적인 모의를 위해서는 모형에서 요구되는 생물리학적 정보가 한반도의 다양한 식생 기능 형태를 현실적으로 잘 반영하는지를 확인해야 할 뿐 아니라 지속적인 현장 관측을 통해서 생물리학적 정보와 관련된 자료기반을 마련하는 것이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원

의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제번호:1-8-3) 및 기상청 국립기상연구소 주요사업 “선진기상기술개발(NIMR-2009-C-1)”과 국립산림과학원의 ‘지구환경변화에 대응한 장기생태연구의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alton, P., L. Mercado, and P. North, 2007: A sensitivity analysis of the land-surface scheme JULES conducted for three forest biomes: Biophysical parameters, model processes, and meteorological driving data. *Global Biogeochemical Cycles* **20**, GB1008.
- Bastidas, L. A., H. V. Gupta, S. Sorooshian, W.J. Shuttleworth, and Z.L. Yang, 1999: Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods. *Journal of Geophysical Research* **104**(D16), 19481-19490.
- 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**(11), 1543-1566.
- Chae, N., 2008: Soil CO₂ efflux in a temperate forest ecosystem under monsoon climate in Northeast Asia. Ph. D. Dissertation, Yonsei University.
- Chae, N., D. Lee, J.-H. Lim, J. Hong, and S. Kang, 2009: Inferring water and carbon exchanges from leaf carbon isotope composition of *Quercus serrata* and *Carpinus laxiflora* grown in a forest with a complex landscape in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**(2), 193-205.
- Collatz, G., M. Ribas-Carbo, and J. Berry, 1992: Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Functional Plant Biology* **19**(5), 519-538.
- 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**(2-4), 107-136.
- Cox, P. M., 2001: Description of the “TRIFFID” dynamic global vegetation model. Technical Note 24, Hadley Centre, Met Office.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. B. Bunton, R. L. H. Essery, P. R. Rowntree, and J. Smith, 1999: The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics* **15**(3), 183-203.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall, and I. J. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* **408**(6809), 184-187.

- Cox, P. M., C. Huntingford, and R. J. Harding, 1998: A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. *Journal of Hydrology* **212-213**, 79-94.
- Cox, P. M., V.R. Jogireddy, and C. Huntingford, 2003: Central estimates and plausible ranges for TRIFFID parameters using Euroflux data. *DEFRA CPP deliverable*, 080403.
- Cramer, W., D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore, G. Churkina, B. Nemry, and A. S. Ruimy, A., 1999: Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results. *Global Change Biology* **5**(Suppl. 1), 1.
- El Maayar, M., D. T. Price, T. A. Black, E. R. Hymphreys, and E.-M. Jork, 2002: Sensitivity tests of the Integrated Biosphere Simulator to soil and vegetation characteristics in a Pacific Coastal coniferous forest. *Atmosphere-Ocean* **40**(3), 313-332.
- Fisher, R., S. Sitch, D. Galbraith, and C. Huntingford, 2008: Vegetation dynamics in JULES v2.0: The TRIFFID model. *JULES science meeting, January, 2008*. [Available from http://www.jchmr.org/jules/pdf/2008_Fisher_TRIFFID.pdf]
- Fox, A., M. Williams, A. D. Richardson, D. Cameron, J. H. Gove, T. Quaife, D. Ricciuto, M. Reichstein, E. Tomelleri, C. M. Trudinger, and M. T. Van Wijk, 2009: The reflex project: Comparing different algorithms and implementations for the inversion of a terrestrial ecosystem model against eddy covariance data. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**(10), 1597-1615.
- Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, G. Bala, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H.D. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. J. Weaver, C. Yoshikawa, and N. Zeng, 2006: Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of Climate* **19**(14), 3337-3353.
- Friend, A. D., A. Arneeth, N. Y. Kiang, M. Lomas, J. Ogee, C. Rodenbeck, S. W. Running, J.-D. Santaren, S. Stephen, N. Viovy, F. I. Woodward, and S. Zaehle, 2007: FLUXNET and modelling the global carbon cycle. *Global Change Biology* **13**(3), 610-633.
- Heimann, M., and M. Reichstein, 2008: Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* **451**(7176), 289-292.
- Henderson-Sellers, A., 1992: Assessing the sensitivity of a land-surface scheme to parameters used in tropical-deforestation experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **118**(508), 1101-1116.
- Hong, J., J. Kim, D. Lee, and J.-H. Lim, 2008: Estimation of the storage and advection effects on H₂O and CO₂ exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research* **44**, W01426.
- Hong, J., C. Cho, T.-Y. Lee, and M. Leclerc, 2009a: Impact of large-scale advection on regional heat flux estimation over patchy agricultural land. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**(2), 221-231.
- Hong, J., H. Kwon, J.-H. Lim, Y.-H. Byun, J. Lee, and J. Kim, 2009b: Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(1), 19-26. (in Korean with English abstract)
- Huntingford, C., P. P. Harris, N. Gedney, P. M. Cox, R. A. Betts, J. A. Marengo, and J. H. C. Gash, 2004: Using a GCM analogue model to investigate the potential for Amazonian forest dieback. *Theoretical and Applied Climatology* **78**(1), 177-185.
- Jacobs, C. M. J., 1994: Direct impact of atmospheric CO₂ enrichment on regional transpiration. Ph.D. Dissertation, Wageningen Agricultural University.
- Janssens, I. A., H. Lankreijer, G. Matteucci, A. S. Kowalski, N. Buchmann, D. Epron, K. Pilegaard, W. Kutsch, B. Longdoz, T. Grünwald, L. Montagnani, S. Dore, C. Rebmann, E. J. Moors, A. Grelle, Ü. Rannik, K. Morgenstern, S. Oltchev, R. Clement, J. Guðmundsson, S. Minerbi, P. Berbigier, A. Ibrom, J. Moncrieff, M. Aubinet, C. Bernhofer, N.O. Jensen, T. Vesala, A. Granier, E.-D. Schulze, A. Lindroth, A. J. Dolman, P. G. Jarvis, R. Ceulemans, and R. Valentini, 2001: Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology* **7**(3), 269-278.
- Kang, M., S. Park, H. Kwon, H. T. Choi, Y.-J. Choi, and J. Kim, 2009: Evapotranspiration from a deciduous forest in a complex terrain and a heterogeneous farmland under monsoon climate. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**(2), 175-191.
- Kim, J., D. Lee, J. Hong, S. Kang, S.-J. Kim, S.-K. Moon, J.-H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B.-L. Lee, and S. Kim, 2006: Hydro Korea and CarboKorea: Cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research* **21**(6), 881-889.
- Kim, S.-B., H.-Y. Chun, and J. Kim, 1998: A validation study of the biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS), using point micrometeorological data. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **34**(4), 602-612. (in Korean with English abstract)
- Knorr, W., and M. Heimann, 2001: Uncertainties in global terrestrial biosphere modeling. I. A comprehensive sensitivity analysis with a new photosynthesis and energy balance scheme. *Global Biogeochemical Cycles* **15**(1), 207-225.
- Kwon, H., J. Kim, J. Hong, and J.-H. Lim, 2010: Influence of the Asian monsoon on net ecosystem carbon exchange in two major ecosystem in Korea. *Biogeosciences* **7**, 1493-1504.
- Kwon, H., T.-Y. Park, J. Hong, J.-H. Lim, and J. Kim, 2009: Seasonality of net ecosystem carbon exchange in two major plant functional types in Korea. *Asia-Pacific Journal of*

- Atmospheric Sciences* **45**(2), 149-163.
- Lee, H. C., J. Hong, C.-H. Cho, B. C. Choi, S.-N. Oh, and J. Kim, 2003: Surface exchange of energy and carbon dioxide between the atmosphere and a farmland in Haenam, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), 61-69.
- Lim, J.-H., J. H. Shin, G. Z. Jin, J. H. Chun, and H. S. Oh, 2003: Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung natural forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), 101-109.
- Liu, Y., H. V. Gupta, S. Sorooshian, L.A. Bastidas, and W. J. Shuttleworth, 2004: Exploring parameter sensitivities of the land surface using a locally coupled land-atmosphere model. *Journal of Geophysical Research* **109**, D21101.
- Pitman, A. J., 1994: Assessing the sensitivity of a land-surface scheme to the parameter values using a single column model. *Journal of Climate* **7**(12), 1856-1869.
- Prata, A. J., 1996: A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **122**(533), 1127-1151.
- Ryu, Y., S. Kang, S.-K. Moon, and J. Kim, 2008: Evaluation of land surface radiation balance derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over complex terrain and heterogeneous landscape on clear sky days. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**(10), 1538-1552.
- Sellers, P. J., J. A. Berry, C. G. J., B. Field C, and F. G. Hall, 1992: Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. 3. A reanalysis using improved leaf model and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing Environment* **42**, 187-215.
- Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo, and L. Bounoua, 1996: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 1: Model formulation. *Journal of Climate* **9**(4), 676-705.
- Sitch, S., C. Huntingford, N. Gedney, P. E. Levy, M. Lomas, S. L. Piao, R. Betts, P. Ciais, P. Cox, P. Friedlingstein, C.D. Jones, I. C. Prentice, and F. I. Woodward, 2008: Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five dynamic global vegetation models (DGVMs). *Global Change Biology* **14**(9), 2015-2039.
- Vetter, M., G. Churkina, M. Jung, M. Reichstein, S. Zaehle, A. Bondeau, Y. Chen, P. Ciais, F. Feser, A. Freibauer, R. Geyer, C. Jones, D. Papale, J. Tenhunen, E. Tomelleri, K. Trusilova, N. Viovy, and M. Heimann, 2008: Analyzing the causes and spatial pattern of the European 2003 carbon flux anomaly using seven models. *Biogeosciences* **5**(2), 561-583.
- Wang, Y. P., D. Baldocchi, R. Leuning, E. Falge, and T. Vesala, 2007: Estimating parameters in a land-surface model by applying nonlinear inversion to eddy covariance flux measurements from eight FLUXNET sites. *Global Change Biology* **13**(3), 652-670.
- Williams, M., A. D. Richardson, M. Reichstein, P. C. Stoy, P. Peylin, H. Verbeeck, N. Carvalhais, M. Jung, D. Y. Hollinger, J. Kattge, R. Leuning, Y. Luo, E. Tomelleri, C. Trudinger, and Y. P. Wang, 2009: Improving land surface models with FLUXNET data. *Biogeosciences Discussions* **6**(2), 2785-2835.
- Wilson, M. F., A. Henderson-Sellers, R. E. Dickinson, and P. J. Kennedy, 1987: Sensitivity of the biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics. *Journal of Applied Meteorology* **26**(3), 341-362.
- Xu, L., and D. D. Baldocchi, 2003: Seasonal trends in photosynthetic parameters and stomatal conductance of blue oak (*Quercus douglasii*) under prolonged summer drought and high temperature. *Tree Physiology* **23**(13), 865-877.