

연구논문

## 기후변화에 따른 수도권 산림의 순일차생산량과 토양탄소저장량의 시공간적 변화 추정

권선순 · 최선희 · 이상돈

이화여자대학교 환경공학과

(2012년 8월 29일 접수, 2012년 9월 25일 승인)

### Estimation of Spatial-Temporal Net Primary Productivity and Soil Carbon Storage Change in the Capital area of South Korea under Climate Change

Sun-Soon Kwon · Sun-Hee Choi · Sang-Don Lee

Dept. of Environmental Science & Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

(Manuscript received 29 August 2012; accepted 25 September 2012)

#### Abstract

The purpose of this study was to estimate the spatial-temporal NPP(Net Primary Productivity) and SCS(Soil Carbon Storage) of forest ecosystem under climate change in the capital area of South Korea using Mapss-Century1 (MC1), one of Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). The characteristics of the NPP and SCS changes were simulated based on a biogeochemical module in this model. As results of the simulation, the NPP varies from 2.02 to 7.43 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> and the SCS varies from 34.55 to 84.81 tC ha<sup>-1</sup> during 1971~2000 respectively. Spatial mean NPP showed a little decreasing tendency in near future (2021~2050) and then increased in far future (2071~2100) under the condition of increasing air temperature and precipitation which were simulated by the A1B climate change scenario of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). But it was estimated that the temporal change of spatial mean NPP indicates 4.62% increasing tendency in which elevation is over 150m in this area. However, spatial mean SCS was decreased in the two future periods under same climate condition.

Keywords : Climate Change, Dynamic Global Vegetation Model, MC1, Forest Carbon Dynamics

## 1. 서론

기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 제4차 기후변화에 관한 평가보고서(2007)에서 1900년 이후 전 지구 평균 기온이 약 0.76°C 상승하였으며, 최근 50년간 장기경향은 1.3°C/100년으로 과거 100년간 0.74°C/100년의 2배 이상 급속히 증가되었다고 발표하였다. 지구 평균 기온이 1.5~2.5°C 정도 증가하면 동·식물 종의 약 20~30%가 멸종 위기에 처하고 생태계의 구조와 기능, 종, 생태계 상호작용, 종의 지리적 분포 부정적인 영향이 전망된다(국립기상연구소, 2009).

이산화탄소는 기후변화를 야기하는 GHG(Green House Gas) 중 단독으로 약 50%의 영향력을 발휘하는 주요 가스이며(Rodhe, 1990), 저감방식으로 크게 두 가지 형태, 즉 배출원(source)을 줄이는 방법과 흡수원(sink)을 증가시키는 방법으로 나뉜다. 현재까지 저감방식의 대부분은 에너지 및 산업 공정에서 발생하는 배출량의 제한 형태에 그 초점이 맞춰져 왔으나, 교토의정서 이후 산림에 의한 이산화탄소 흡수량이 감축목표 산정에 허용되면서 지구온난화를 완화시키는 산림의 역할에 대한 관심이 증대되고 있다.

산림의 탄소동화작용은 대기 중 탄소를 매우 효율적으로 고정시키는 시스템일 뿐 아니라 경관 가치가 크고 공기정화, 기온조절을 통해 쾌적한 생활공간을 제공하고 육상생태계 보전에도 기여할 수 있다(산림청, 2009). 산림생태계의 기능을 평가할 수 있는 기본적인 지표로는 순일차생산량(NPP: Net Primary Production)과 토양탄소저장량(SCS: Soil Carbon Storage)이 있으며 이는 산림생태계 기후변화 취약성 평가 및 탄소 수지 평가에도 이용된다. 여기서 NPP는 식물의 광합성에 의해 고정된 총 에너지양에서 식물의 성장과 유지에 사용되는 에너지양을 제한 값을 말한다.

산림생태계를 보전하고 지구온난화현상을 저감시키기 위해서는 기후변화에 따른 산림생태계의 변화 양상, 취약성 평가, 탄소흡수량 변화를 보다 정

확히 예측할 필요가 있다. 산림생태계의 탄소 수지를 평가하기 위해서 다양한 방법들이 사용되고 있는데, 생물학적 측정 방법, 에디 공분산 기술을 이용한 탄소 플럭스 측정방법, 생물리학적 모델링 기법, 초분광 위성영상을 이용한 원격탐사 기법 등이 있다. 이러한 방법 중 육상 생태계 모델은 탄소 순환 연구에서 필수적인 도구로 생각되고 있으며 한 지점으로부터 전 지구적 규모까지의 탄소 수지를 평가할 수 있는 장점이 있고 예측된 미래 기후자료를 적용하면 미래의 탄소 수지 변화 예측도 가능하다. 생태모형에는 생지화학적 모형과 동적식생모형이 주로 활용되고 있다. 생지화학적 모형은 식생의 변화를 모의하지 않고 고정된 식생 조건에서 탄소나 질소 등의 순환에 대해 예측하는 반면, 동적식생모형(DGVMs)은 식생종의 변화를 고려하므로 기후변화에 따른 식생의 변화와 상호 연관성을 모의하고 대기과 식생간의 피드백 과정을 면밀히 관찰할 수 있어 장기간 변화 모의에 적합하다.

유성진 등(2012)은 시공간 환경정보를 이용하여 VISIT(Vegetation Integrated Simulator for Trace gases)라는 생태계 모형을 구동한 결과 우리나라 식생생태계가 연평균 3.51 Tg C/year의 탄소를 흡수하는 역할을 수행한다고 하였고, Choi *et al.*(2011)은 MC1 모델을 이용하여 한반도의 기후변화에 따른 식생분포 변화 예측 및 NPP와 SCS의 변이 분석을 통해 식생 분포의 취약성과 산림생태계 기능의 취약성에 따라 산림생태계의 취약성 평가를 시도한 바 있으나, 본 연구보다 대상 지역이 넓고 공간해상도가 다소 커(1km) 특정 관심 지역 산림의 탄소흡수량 시공간적 변화 특성을 살펴보기 위해서 본 연구에서는 대상 지역을 수도권으로 좁히고 공간해상도를 500m로 설정하여 시뮬레이션 하였다.

이러한 생태계 모델 연구에서는 미래 기후뿐만 아니라 고도, 경사, 향 등의 지형적 요소가 수종의 생육조건에 주요한 영향을 미치므로 다양한 인자가 고려된 한국형 모델의 개발이 필요하다(이상철 등 2011). 본 연구와 같이 산림생태계 모델을 이용한

다양한 독립적인 연구결과의 비교 및 검증을 통해 모델에 적용된 알고리즘을 계산하고 변수를 보정하면 보다 신뢰성 있는 NPP와 SCS의 예측 및 산림의 탄소수지 추정이 가능할 것이다.

본 연구에서는 기후변화에 대응하기 위한 이산화탄소 흡수원(sink)으로서 산림의 기능을 고려하여 육상 생태계 모델 중 생지화학적 개념이 도입된 동적식생모형(Dynamic Global Vegetation Model, DGVM)을 이용하여 수도권 산림의 NPP와 SCS 시공간적 변화를 추정하고 그 결과를 고찰하였다. 이러한 연구결과를 토대로 각종 토지이용계획 수립시 기후변화에 따른 영향을 최소화하는 방안을 모색하는데 참고할 수 있는 자료를 제공하는 데 본 연구의 목적이 있다.

## II. 연구 지역 및 방법

### 1. 연구 지역

연구 대상 지역은 남한의 수도권(서울시, 인천시, 경기도) 지역으로 124° 59' ~127° 85' 범위의 경도와 36° 89' ~38° 29' 범위의 위도에 위치해 있다. 2009년 말 기준으로 전체 면적의 약 50%가 산림 지역이며(산림청 홈페이지), 기후는 온대기후로 연평균 기온은 11~13℃ 이고 연평균 강수량은 1,100mm이다.

본 연구 대상지는 남한 인구의 절반가량(전국 48백만 명 중 23백만 명, 2010년 인구조사 잠정집계 기준)이 집중되어 있어 토지이용에 대한 요구가 가장 많은 지역이다. 수도권 지역 산림면적은 2010년

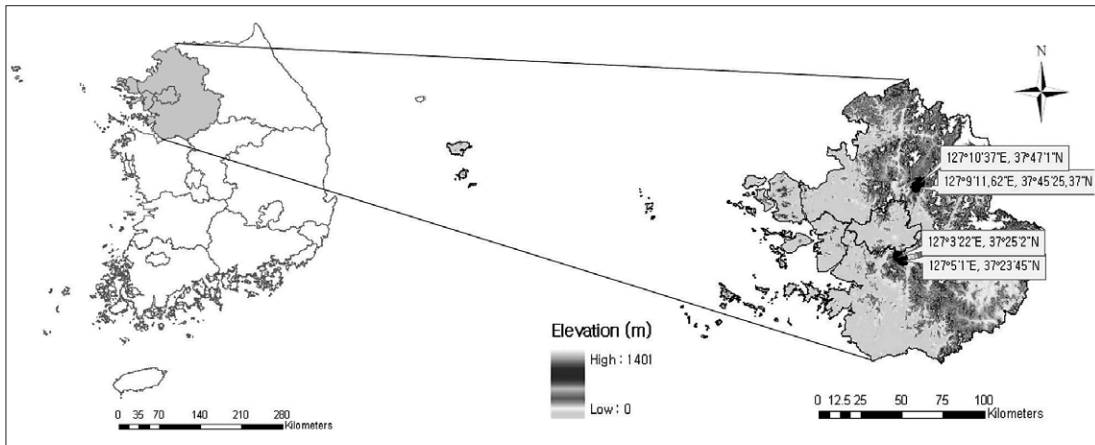


Fig. 1. Study Area: The capital area of South Korea

Table 1. The characteristics of selected sites and capital area

discription	A		B		C		D		Study Area
	Kwangneung Forest (KoFlux DK-site)		Kwangneung Forest (Sampling site)		Kumto Mountain		Chunggye Mountain		Capital Area
latitude	37° 45' 25.37"		37° 47' 1"		37° 23' 45"		37° 25' 2"		
longitude	127° 9' 11.62"		127° 10' 37"		127° 5' 1"		127° 3' 22"		
altitude(m)	244		341		129		330		130
yearly mean temperature (°C)	past	10.1	9.38	11.08	9.76	10.84			
	near future	11.2	11.48	12.53	10.87	12.23			
	far future	13.8	14.14	15.22	13.5	14.88			
monthly mean precipitation (mm)	past	97.96	95.35	101	95.8	100.69			
	near future	107.3	109.8	111	102.8	110.95			
	far future	121.2	123.7	124.5	115.6	124.54			

기준으로 서울시 15,719ha, 인천시 40,427ha, 경기도 526,985ha 이나, 전답, 목장, 대지, 공장, 도로, 골프장 등으로 전용되어 매년 평균 1,940ha (2003-2009년 평균치) 감소하고 있으며 산불에 의한 피해 면적도 매년 평균 16.4ha(2003-2009년 평균치)에 이른다(임업통계연보, 2004-2010)

대상지의 해발고도와 결과 분석 시 비교 자료로 설명되는 지점별 위경도를 표시하고(Fig. 1), 연구 대상지내 지점별 비교 설명을 위해 선택한 지점별 특징을 나타내었다(Table 1).

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 DGVMs 중 하나인 Mapss-Century1 (MC1) 모형을 활용하여 수도권 지역 산림을 대상으로 과거 30년(1971~2000년), A1B 시나리오의 미래 기후 조건에 따라 가까운 미래(2021~2050년)와 먼 미래(2071~2100년)의 NPP와 SCS 변화를 모의하였다.

MC1 모델은 미국 오레곤 대학에서 개발되어 기후변화가 생태계 구조나 기능에 잠재적으로 미치는 영향을 평가하며 landscape 수준(50m)에서 지구 규모 넓은 범위까지의 공간스케일에서 천이역학을 포함시켜 생태계 변화의 패턴에 대해 예측할 수 있다(Bachelet *et al.*, 2001). 본 모델은 생물지리학에 근거한 MAPSS 모델(Neilson, 1995)과 생지화학적 과정을 패키지 한 수정된 버전의 CENTURY (Parton *et al.*, 1994)와 새로운 화재 간섭 모델로 MCFIRE(Lenihan *et al.*, 1998)가 결합되어 있으며, 특히 생지화학적 모듈은 식물의 성장, 유기물의 분해, 생태계에서 물과 영양염의 거동을 예측할 수 있어 세 가지 모듈의 상호 정보 교환을 통해 기후변화에 따른 식생 분포 변화와 탄소, 질소, 물 순환 등을 모의할 수 있는 장점이 있다(Bachelet *et al.*, 2001).

미국 캘리포니아 주에서는 MC1을 이용하여 지역 규모부터 대륙단위까지의 공간스케일로 기후변화에 따른 식생 분포 변화, 탄소분포 변화, 화재 양상 변화를 예측하였고(Lenihan *et al.*, 2008), 우리나라에서도 MC1을 이용하여 한반도의 식생분포 변화

와 육상탄소 분포에 대해 모의한 사례가 있다(Choi *et al.*, 2011).

본 연구에서는 기후에 따라 변화하는 대기와 식생간의 피드백 과정을 잘 반영하고 carbon dynamics를 함께 예측할 수 있는 MC1 모델에 A1B 시나리오에 따라 예측된 미래 기후자료를 이용하여 NPP와 SCS의 변화를 모의하였다

본 연구에 사용된 시뮬레이션의 공간해상도는 0.005도로 하나의 결과 값을 나타내는 격자의 넓이는 약 0.25 km<sup>2</sup>이고, 격자수는 49,046개로 입력하였다. 시간적 범위는 과거 30년(1971~2000년) 동안 기상청에서 측정된 기후자료와 IPCC에서 제시한 A1B 시나리오에 따라 국립기상과학연구소에서 예측한 우리나라 미래 기후자료를 가까운 미래(2021~2050년)와 먼 미래(2071~2100년)로 나누어 이용하였다.

MC1 모형의 주요 입력 자료는 고도, 위도와 같은 지형 정보와 월평균 기온, 월평균 최고 기온, 월평균 최저 기온, 월평균 누적 강수량, 월 평균 습도, 풍속과 같은 기후 정보 그리고 토양 밀도, 토성, 암석 비율과 같은 토양 정보이다. 기후자료는 기상청의 측정자료와 국립기상과학연구소의 예측자료를 이용하였고, 토양 자료는 국립농업과학원과 국제식량농업기구(Food and Agriculture Organization)에서 제공되는 자료를 이용하였다. 고도, 위도 등 지형정보와 토지피복 자료는 수치표고모델(Digital Elevation Model), 행정구역도, 환경부의 생태자연도(2008) 등을 이용하였다. 이 중 온도와 강수량은 측정지점의 해발고도 및 측정 장비의 높이 효과를 고려하여 기온감률 및 강수 증감률을 적용하여 해수면 높이에서의 관측 값으로 보정하였다. 모형에 사용되는 모든 입력 자료는 공간상으로 연속적으로 구성될 필요가 있으므로 미관측 지점에 대한 자료를 취득하기 위해 공간내삽법을 이용하였고(이민아 등, 2007), 모든 자료는 World Geodetic System(WGS-84) 좌표계의 지리정보를 기반으로 하고 있으며 ESRI사에서 제공하는 Arc/Info 9.3의 GIS 툴을 활용하였다.

Table 2. The results of Net Primary Productivity in selected sites and capital area

		A	B	C	D	capital area
NPP (tC/ha/yr)	past	6.67	6.56	6.69	6.59	6.02
	near future	6.63	6.38	6.4	6.77	5.85
	far future	6.73	6.47	6.21	6.88	5.88

### III. 결 과

#### 1. Net Primary Production의 시공간적 변화

1971년에서 2000년까지 과거 30년 기후자료와 토양자료를 통해 모의된 산림의 순일차생산량은 2.02~7.43 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 범위로 나타났으며 연구 대상지에서의 평균값은 6.02 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 이었고 지점별 모의 값은 Table 2와 같다.

미래 기후 시나리오에 따라 수도권 지역 평균 연평균 기온이 1.4℃, 월평균 강수량이 10% 가량 증가하는 가까운 미래(2021~2050) 모의 결과, NPP는 2.32~7.63 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 범위로 나타났으며 평균값은 5.85 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 로 과거 대비 3% 감소하였다. 연평균 기온이 4℃, 월평균 강수량이 24% 가량 증가하는 먼 미래(2071~2100)의 NPP는 2.89~7.67 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 범위로 나타났으며 평균값은 5.88 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 로 과거 대비 2% 감소하였고 가까운 미래 대비 0.5% 증가하였다(Table 2). 지점별로 변화양상이 상이하였는데, 과거 모의 결과를 기준으로 가까운 미래에는 A, B, C 지점 모두 감소하였고 D 지점은 증가하였다. 먼 미래에는 과거 대비 B, C 지점은 감소하였고 A, D 지점은 증가하였다.

서울특별시, 인천광역시, 경기도 북부, 경기도 남부 지역별 평균으로 살펴보면 과거의 경우 경기도 북부 지역이 5.69 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 로 평균 NPP가 낮게 모의되었으며 인천광역시가 6.6 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 로 높게 모의되었다. 미래 예측 결과는 가까운 미래에서 4개 지역 모두 NPP가 감소하였으며 먼 미래에서 서울특별시, 인천광역시, 경기도 남부 지역과

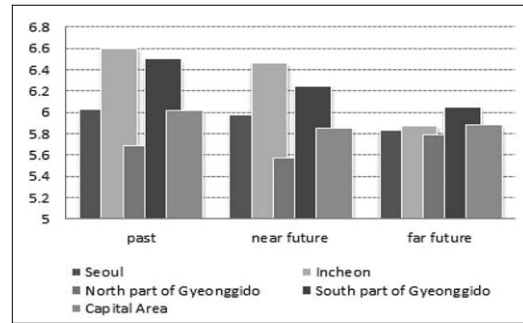


Fig. 2. Spatial-temporal mean Net Primary Productivity (tC/ha/yr) changes based on the regional groups in the study area in past(1971~2000), near future (2021~2050) and far future(2071~2100).

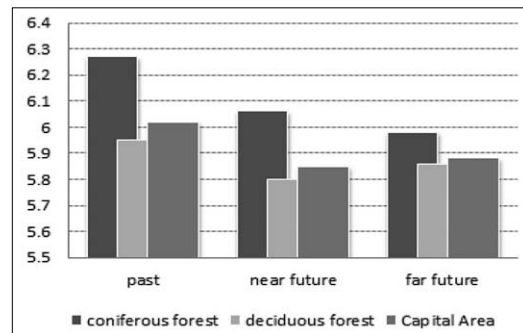


Fig. 3. Spatial-temporal mean Net Primary Productivity (tC/ha/yr) changes based on the type of forest in the study area in past(1971~2000), near future (2021~2050) and far future(2071~2100).

달리 경기 북부 지역은 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 2).

임상별로는 침엽수림의 평균 NPP가 6.27 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 로 활엽수림의 평균 NPP 5.95 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 에 비해 높게 모의되었고, 침엽수림의 경우 가까운 미래에서 먼 미래까지 지속적으로 감소하는 경향을 보였으나 활엽수림의 경우 가까운 미래에서는 감소하다가 먼 미래에서는 가까운 미래 대비 1% 가량 증가하는 양상을 보였다(Fig. 3).

고도별 평균 NPP 변화 추세를 살펴보면 미래에 NPP가 감소하는 경향을 보인 지역은 해발고도 150m이하의 낮은 산림 지역과 수변 식생지역이었으며, 해발고도 150m이상의 산림에서는 지속적으로 NPP가 증가하는 경향을 보여 과거 대비 먼 미래까지의 평균 증가율은 4.62%로 나타났다.

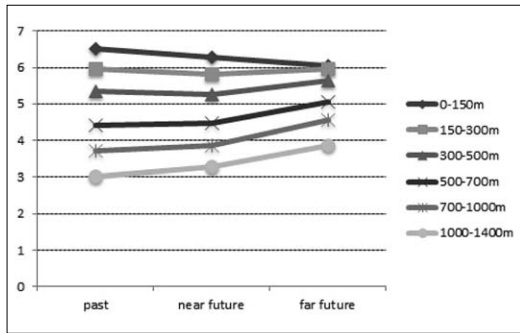


Fig. 4. Spatial-temporal mean Net Primary Productivity (tC/ha/yr) changes based on the altitude in study area in past(1971~2000), near future(2021~2050) and far future(2071~2100).

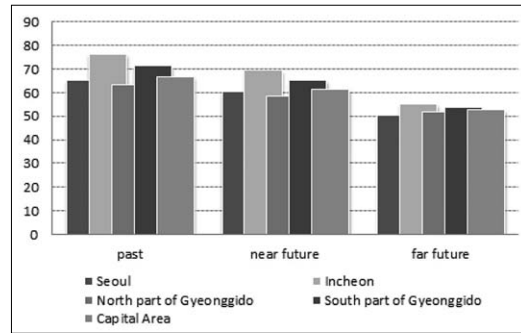


Fig. 5. Spatial-temporal mean Soil Carbon Storage(tC/ha) changes based on the regional groups in the study area in past(1971~2000), near future(2021~2050) and far future(2071~2100).

Table 3. The results of Soil Carbon Storage in selected sites and capital area

		A	B	C	D	capital area
SCS (tC/ha)	past	77.57	75.12	72.75	77.92	66.84
	near future	72.33	68.95	65.46	74.34	61.37
	far future	61.97	59.24	54.23	64.75	52.81

## 2. Soil Carbon Storage의 시공간적 변화

1971년에서 2000년까지 과거 30년 기후자료와 토양자료를 통해 모의된 토양탄소저장량은 34.55~84.81 tC ha<sup>-1</sup> 범위로 지역적 평균값은 66.84 tC ha<sup>-1</sup> 이었고 지점별 모의 값은 Table 3 과 같았다.

가까운 미래(2021~2050) 모의 결과 토양탄소 저장량 평균값은 61.37 tC ha<sup>-1</sup> 이었고, 먼 미래 (2071~2100) 모의 결과 토양탄소 저장량 평균값은 52.81 tC ha<sup>-1</sup> 로 나타나(Table 3), 수도권 지역 토양탄소량 평균값은 지속적으로 감소하는 추세를 보였다. 지점별로도 과거 값을 기준으로 가까운 미래와 먼 미래에서 A, B, C, D 지점 모두 감소하였으며 지역별로 감소폭은 상이하게 나타났다.

서울특별시, 인천광역시, 경기도 북부, 경기도 남부 지역별 평균을 살펴보면 과거의 경우 경기도 북부 지역이 63.53 tC ha<sup>-1</sup> 로 평균 SCS가 낮게 모의되었으며 인천광역시가 76.41 tC ha<sup>-1</sup> 로 높게 모의되었다. 미래 구간에서는 4개 지역 모두 평균

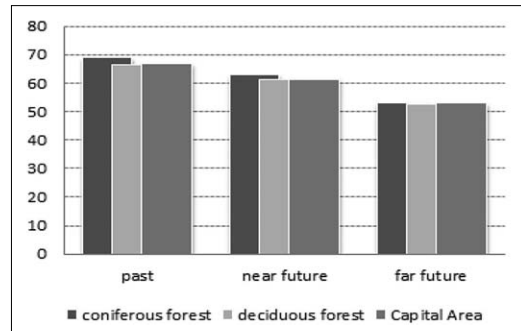


Fig. 6. Spatial-temporal mean Soil Carbon Storage changes(tC/ha) based on the type of forest in the study area in past(1971~2000), near future(2021~2050) and far future(2071~2100).

SCS가 감소하였다(Fig. 5).

임상별로 살펴보면 과거의 경우, 침엽수림의 평균 SCS가 68.81 tC ha<sup>-1</sup> 로 활엽수림의 66.34 tC ha<sup>-1</sup> 에 비해 3%가량 높게 모의되었으며, 침엽수림과 활엽수림 모두 미래 구간에서는 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 6).

## IV. 고찰

NPP 모의 결과, 본 연구에서는 A 지점의 과거 구간 모의 값이 6.67 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 로 나타났으나 임희정 등(2010)은 동 지점의 NPP를 Community Land Model 3.5-DGVM로 시뮬레이션한 결과 6.04 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 로 모의하여 본 연구보다 9.4% 작았다. 침엽수림의 평균 NPP는 6.27 tC ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

로 활엽수림의 평균 NPP  $5.95 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  에 비해 높게 모의되어 홍지연 등(2011)의 결과와 부합하였다(Fig. 3). 미래 변화양상은 수도권 평균으로는 감소했다가 약간 증가하는 경향을 보였으나 침엽수림은 지속적으로 감소하였고 활엽수림은 감소했다가 증가하는 경향을 보였고 해발고도 150m 이상 지역에서는 지속적으로 증가하는 양상을 보였다. 지형, 임상, 고도 등 지역 특성 및 그 분포 특성에 따라 수도권 산림의 미래 NPP 변화양상은 일부 상이한 결과를 보였는데 낮은 고도의 도시림이 포함된 수도권 산림지역의 특성으로 판단된다.

Nemani *et al.*(2003)은 기후변화에 대한 식생 반응을 전 지구적으로 조사하기 위해 과거 18년간의 기후 자료와 식생 활동에 대한 위성 관찰 자료를 분석하여, 기후변화는 특히 중위도와 고위도 지역의 식물 성장을 개선시켜 전 지구적으로는 NPP를 6% 정도 증가시킨다고 하였고, Peng *et al.*(2009)은 TRIPLEX 모델을 이용하여 중국북동부 지역의 산림 성장과 C, N 거동을 모의한 결과 온도와 강수량이 증가하는 기후 시나리오에서 1999년을 기준으로 2030년대에는 산림의 NPP가 1~3%, 2090년대에는 6~14% 증가한다고 하였다. 이러한 국외 연구 대상지는 고도가 높은 밀집 자연림 지역이며 본 연구의 대상지는 도시림을 포함하는 수도권 산림지역으로 차이가 있으나 본 연구의 해발고도 150 m 이상 산림지역에서는 NPP가 2100년까지 지속적으로 증가하는 양상을 보여 상기 결과의 경향과 일치하였다(Fig. 4).

SCS 모의 결과, 본 연구에서는 A 지점의 경우 토양탄소저장량은  $77.57 \text{ tC ha}^{-1}$  로 모의되었으나, 임희정 등(2010)은 CLM 3.5를 활용하여 토양탄소량을  $73.8 \text{ tC ha}^{-1}$  (본 연구의 결과치 보다 4.8% 과소 모의)로 시뮬레이션 하였고, A 근접지점에서 이재석 등(2005)은  $89.3 \text{ tC ha}^{-1}$  (토심 30cm)로 추정하였다. B 지점의 경우 본 연구의 결과 토양탄소저장량은  $75.12 \text{ tC ha}^{-1}$  로 모의하였으나, 이아름 등(2009)은 경기도 광릉지역 토양탄소량 실측치가  $45.40 \pm 3.87 \text{ tC ha}^{-1}$  (토심 30cm)이며 국내 소

나무림 토양탄소 저장량을 문헌에 근거하여 토심 30cm 깊이로 보정한 결과 평균  $46.28 \pm 30.72 \text{ tC ha}^{-1}$  라고 하였다. 즉, 실측치와는 유사하나 같은 수종이라도 미세기후 및 공간적 특성(임분 밀도, 임령, 토양특성 등)에 따라 토양탄소값의 변동이 커 표준편차가 매우 높다는 결론을 도출하였다. 미래 변화양상은 수도권 평균과 대부분 지점에서 지속적으로 감소하는 경향을 보였다.

지구온난화에 따른 미래 토양탄소량을 모의한 결과로 Bonan and Van Cleve(1992)는 캐나다 한대림에서, Melillo *et al.*(2002)은 미국 매사추세츠 중위도 산림에서, Neff and Hooper(2002)는 알래스카 한대림에서, Trumbore *et al.*(1996)은 평균 기온이 증가하면 모든 기후대의 산림 토양에서 탄소저장량이 감소한다고 하였다. Peng *et al.*(2009)은 TRIPLEX 모델을 이용하여 중국북동부 지역의 산림 성장과 C, N 거동을 모의한 결과 온도와 강수량이 증가하는 기후 시나리오에서 1999년을 기준으로 2030년대에는 산림의 토양 탄소가 5%, 2090년대에는 3% 감소한다고 하였다. 온도가 산림 토양 중에 저장되는 탄소에 어떤 영향을 미치는지, 즉 기후변화에 따른 토양탄소의 변화는 아직 논란의 여지가 남아 있으나(Davidson and Janssens, 2006), 대체적으로 기온변화가 일어나게 되면 토양 내 미생물의 호흡으로 인하여 토양탄소가 감소하는 것으로 알려져 있어 본 연구의 모의 결과와도 부합하였다.

본 연구의 모의 값과 일부 실측치와의 차이가 발생하는 이유와 이에 따라 개선이 시급히 필요한 점은 본 연구에서 활용한 DGVM이 미국의 산림 특성에 따라 개발된 모형으로 우리나라의 지형 특성 및 산림생태 특성을 잘 반영하고 있지 않은 근본적인 한계가 존재하기 때문이다. 우리나라의 특성을 반영한 한국형 산림 생태 모형의 개발과 이를 검증할 수 있는 현장 실측자료 확보를 위해 장기 식생조사가 지속적으로 필요할 것이다.

아울러, 산림생태계의 순일차생산량이나 토양탄소저장량을 측정하거나 모델을 통해 예측한 결과는

기후변화에 대비하여 이산화탄소 흡수원으로서 산림에 대한 중요성이 부각되고 있는 최근 현실을 감안하여 국가 차원의 국토종합계획이나 수도권 정비 계획, 시도 차원의 각종 토지이용계획 및 택지개발 계획의 수립 시 고려될 필요가 있다. 식생의 탄소저감효과를 극대화하기 위해서는 기후변화에 따른 변화가 많이 일어나는 지역의 개발을 최소화하고, 개발을 추진하더라도 이에 대한 대안과 중점 관리방안 제시가 필요할 것이다. 이러한 연구결과를 토대로 각종 토지이용계획 수립시 기후변화에 따른 영향을 최소화하는 방안을 모색하는데 참고할 수 있는 자료를 제공하는 데 본 연구에 의의가 있다.

## 사 사

KEITI(403-112-005) 및 NRF(2009-1419-5)에 지원에 의해 이루어 졌습니다. 고려대학교 GIS/RS 센터의 최성호 연구원에게 감사를 전한다.

## 참고문헌

- 국립기상연구소, 2009, 기후변화 이해하기: IPCC 4차 평가보고서 실무그룹 I, II, III 기술요약 보고서 표와 그림을 중심으로.
- 산림청, 2004~2010, 임업통계연보, 산림청 <http://www.forest.go.kr>
- 산림청, 2009, 기후변화와 산림 26p, <http://carbon.kfri.go.kr>
- 유성진, 이우균, 손요환, Akihiko Ito, 2012, 생태계 모형과 시공간 환경정보를 이용한 우리나라 식생 탄소 수지 추정, 대한원격탐사학회지, 28(1), 145-157.
- 이민아, 이우균, 송철철, 이준학, 최현아, 김태민, 2007, 기온 및 강수량의 시공간 변화예측 및 변이성, 한국GIS학회지, 15(3), 267-278.
- 이상철, 최성호, 이우균, 박태진, 오수현, 김순아, 2011, 기후변화 시나리오에 따른 산림분포 취약성 평가, 한국임학회지, 100(2), 256-265.
- 이아름, 노남진, 윤태경, 이수경, 서경원, 이우균, 조용성, 손요환, 2009, 연륜연대학적 접근을 이용한 Yasso 모델의 산림토양탄소 저장량 추정, 한국임학회지, 98(6), 791-798.
- 이재석, 서상욱, 민윤경, 채남이, 김준, 구진우, 박래현, 손요환, 임종환, 2005, 광릉 낙엽 활엽수림의 탄소 수지, 한국농림기상학회 학술 발표, 2, 15-18.
- 임희정, 이영희, 권효정, 2010, 광릉 활엽수림에서 Community Land Model version 3.5-Dynamic Global Vegetation Model의 평가, 한국농림기상학회, 12(2), 95-106.
- 홍지연, 심창섭, 이명진, 백경혜, 송원경, 전성우, 박용하, 2011, 위성영상으로 분석한 장기간 남한지역 순일차생산량 변화: 기후인자의 영향, 대한원격탐사학회지, 27(4), 467-480.
- Bachelet, D., Lenihan, J.M., Daly, C., Neilson, R.P., Ojima, D.S., Parton, W.J., 2001, MC1: A Dynamic Vegetation Model for Estimation the Distribution of Vegetation and Associated Ecosystem Fluxes of Carbon, Nutrients, and Water, Technical Documentation version 1.0, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Bonan, G.B. and Van Cleve, K., 1992, Soil temperature, nitrogen mineralization, and carbon source-sink relationships in boreal forests, Can. J. Forest Res. Rev. Can. Rech. Forest, 22, 629-639.
- Choi, S., Lee, W.K., Kwak, H., Kim, S.R., Yoo, S.J., Choi, H.A., Park, S.M., Lim, J.H., 2011, Vulnerability Assessment of Forest Ecosystem to Climate Change in Korea Using MC1 Model, Journal of Forest Planning, 16, 149-161.
- Davidson, E.A. and Janssens, I.A., 2006,



- Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change, *Nature*, 440(9), 165-173.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Group I, and to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland., pp. 104.
- Lenihan, J.M., Bachelet, D., Neilson, R.P., Drapek R., 2008, Response of Vegetation distribution, ecosystem productivity, and fire to climate change scenarios for California, *Climate Change*, 87(1), S215-S230.
- Lenihan, J.M., Daly, C., Bachelet, D., Neilson, R.P., 1998, Simulating broad-scale fire severity in a dynamic global vegetation model, *Northwest Sci.*, 72(2), 91-103.
- Melillo, J.M., Steudler, P.A., Aber, J.D., Newkirk, K., Lux, H., Bowles, F.P., Catricala, C., Magill, A., Ahrens, T., Morrisseau, S., 2002, Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system, *Science*, 298, 2173-2176.
- Neff, J.C. and Hooper, D.U., 2002, Vegetation and climate controls on potential CO<sub>2</sub>, DOC and DON production in northern latitude soils, *Global Change Biol.*, 8, 872-884.
- Neilson, R.P., 1995, A model for predicting continental scale vegetation distribution and water balance, *Ecological Applications*, 5(2), 362-385.
- Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B., Running, S.W., 2003, Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999, *SCIENCE*, 300, 1560-1563.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Ojima, D.S., Cole, C.V., 1994, A general study model for soil organic matter dynamics, sensitivity to litter chemistry, texture, and management, In: *Quantitative modeling of soil forming processes*. SSSA Spec. Publ. 39. Madison, WI: Soil Science Society of America, 147-167.
- Peng, C., Zhou, X., Zhou, S., Wang, X., Zhu B., 2009, Quantifying the response of forest carbon balance to future climate change in Northeastern China: Model validation and prediction, *Global and Planetary Change*, 66, 179-184.
- Rodhe, H., 1990, A comparison of the contributions of various gases the greenhouse effect, *Science*, 248, 1217-1219.
- Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Amundson, R., 1996, Rapid Exchange Between Soil Carbon and Atmospheric Carbon Dioxide Driven by Temperature Change, *SCIENCE*, 272, 393-396.