

## 기후변화에 따른 식생과 토양에 의한 탄소변화량 공간적 분석

이동근 · 박찬\* · 오영철\*

서울대학교 조경·지역시스템공학부 · \*서울대학교 대학원

### Projected Spatial-Temporal changes in carbon reductions of Soil and Vegetation in South Korea under Climate Change, 2000-2100

Lee, Dong-Kun · Park, Chan\* · Oh, Young-Chool\*

*Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University*

*\*Graduate School of Seoul National University*

**ABSTRACT** : Climate change is known to affect both natural and managed ecosystems, and will likely impact on the terrestrial carbon balance. This paper reports the effects of climate change on spatial-temporal changes in carbon reductions in South Korea's during 2000-2100. Future carbon (C) stock distributions are simulated for the same period using various spatial data sets including land cover, net primary production(NPP) and leaf area index (LAI) obtained from MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), and climate data from Data Assimilation Office(DAO) and Korea Meteorological Administration(KMA). This study attempts to predict future NPP using multiple linear regression and to model dependence of soil respiration on soil temperature. Plants store large amounts of carbon during the growing periods. During 2030-2100, Carbon accumulation in vegetation was increased to 566 ~ 610gC/m<sup>2</sup>/year owing to climate change. On the other hand, soil respiration is a key ecosystem process that releases carbon from the soil in the form of carbon dioxide. The estimated soil respiration spatially ranged from 49gC/m<sup>2</sup>/year to 231gC/m<sup>2</sup>/year in the year of 2010, and correlating well with the reference value. This results include Spatial-Temporal C reduction variation caused by climate change. Therefore this results is more comprehensive than previous results. The uncertainty in this study is still large, but it can be reduced if a detailed map becomes available.

**Key words** : MODIS, Carbon Flux, NPP, Respiration, Land Cover

## 1. 서 론

기후변화의 심각성에 따라 탄소저감에 대한 논의가 전 지구적으로 논의되고 있다. 대기와 지표면 사이의 탄소의 흐름을 시공간적으로 이해하는 것은 이러한 탄소저감 논의에 있어서 중요한 요소이다(Zhao et al., 2010). 지표면과 대기사이의 탄소의 흐름은 식생의 성장, 분해, 기후, 토양특성, 인간활동 등과의 복잡한 상호관계 속에서 나타난 결과이다(Schwaiger and Bird, 2003).

식생에 의해 축적된 탄소 중 일부는 토양으로 유입이 되고 토양 내 미생물의 호흡과 분해 작용으로 인하여 일

부는 땅속에 저장되고 일정부분은 다시 대기 중으로 배출되게 된다(Lal, 2004; Smith et al., 2008). 탄소의 순환 과정에서 기후변화가 야기하는 생태계 순환과정의 변화에 대한 관심이 증가하고 있으며, 기후변화가 탄소 순환 과정에 미치는 정량적 영향을 파악하려는 연구는 매우 중요하게 인식되고 있다(Lal, 2004; Rounsevell et al., 2005). 특히 최근 저탄소 녹색성장 기조에 따라 수립되는 저탄소 녹색도시 계획에 있어 식생과 토양을 통한 탄소저감계획이 수립되고, 토지이용계획, 환경영향평가제도에서 탄소저감방안이 논의되고 있는 상황에서 기후변화에 따른 미래 탄소흡수량 변화를 파악하는 것은 매우 중요하다.

현재 탄소순환과정을 이해하기 위해 현장실험기법, 인공위성 혹은 항공원격탐사를 이용한 기법, 과정기반의

Corresponding author : Park, Chan

Tel : 02-880-4885

E-mail : momo7@snu.ac.kr

생태계모형을 이용하는 방법 등 다양한 기법들이 사용되고 있다(Running et al., 1999). 이 중 광역적인 차원에서 기후변화에 따르는 탄소순환의 공간적 변화를 이해·규명하고 식생기반의 탄소순환 연구를 위해 인공위성을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중에서 미항공우주국(NASA)에서 운영하고 있는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 영상자료는 식생에 의한 장기적인 탄소변화에 대한 모니터링에 유용하게 사용되고 있다(Heinsch et al., 2003). 실제로 MODIS를 이용하여 전 지구적인 탄소흐름 추정에 관한 연구와 지역적 차원에서의 이산화탄소 모니터링에 관한 다수의 연구가 진행 중이며, MODIS자료의 신뢰도를 높이기 위한 방법론 및 현황분석에 관한 연구가 수행되고 있다(강신규 등, 2005; 김영일 등, 2007; Gibbs et al., 2007.; Zhang et al., 2009).

기후변화에 의한 토양의 탄소변화에 대한 연구는 위성영상을 활용한 연구보다는 현장조사, 실험, 모델링과 관련된 연구가 진행되고 있다(Smith et al., 2008). 기후변화에 따른 토양탄소의 변화는 아직 논란의 여지는 남아 있지만, 대체적으로 기온변화가 일어나게 되면 토양 내 미생물의 호흡으로 인하여 토양탄소가 감소하는 것으로 알려져 있다(Smith et al., 2005). 토양의 탄소량의 변화는 토양특성, 기후, 식생 등에 의해 다양한 양상을 보이기 때문에 미래 변화를 파악하는데 불확실한 부분이 남아 있지만 모델링 연구를 통해서 파악가능하다(Parshotam et al., 2001).

우리나라의 경우 기후변화에 따른 식생 및 토양에 의한 탄소 흡수량 변화에 연구가 미흡하기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. 특히 탄소 흡수원의 가치에 있어서 농촌지역의 농경지 식생 및 토양의 역할이 고려되지 못했기 때문에, 본 연구에서는 농경지, 시가화지역을 포함한 국가 전체차원에서의 토양과 식생의 상호작용을 고려한 탄소흐름을 분석하였다. 이를 위해서 국토 전체의 탄소흐름에 대한 공간자료를 제공받을 수 있는 MODIS 영상자료와 통계자료를 활용하여 미래 기후변화에 따른 탄소흐름의 변화양상을 파악하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

본 연구에서는 생태계(식생, 토양)로부터 탄소의 순 획득량 또는 순 손실량을 계산하여 우리나라의 탄소저감량을 계산하기 위하여 총 광합성량에서 식물의 호흡에 의한 배출량과 토양 내 미생물의 분해 및 호흡에 의한 배출량을 제외한 순생태계생산량(NEP: Net Ecosystem

Production)을 산출하였다. 기후변화에 따른 식생 탄소흡수량 변화를 예측하기 위하여 MODIS를 이용해 생성된 자료를 활용하여 산림과 농경지, 시가화지역에의 기후변화에 따른 탄소흡수량(NPP 축적량) 변화 예측 모델을 도출하였다. 또한 모델링 연구를 통하여 기후변화에 따른 토양탄소량 변화를 예측하였다(Figure 1).

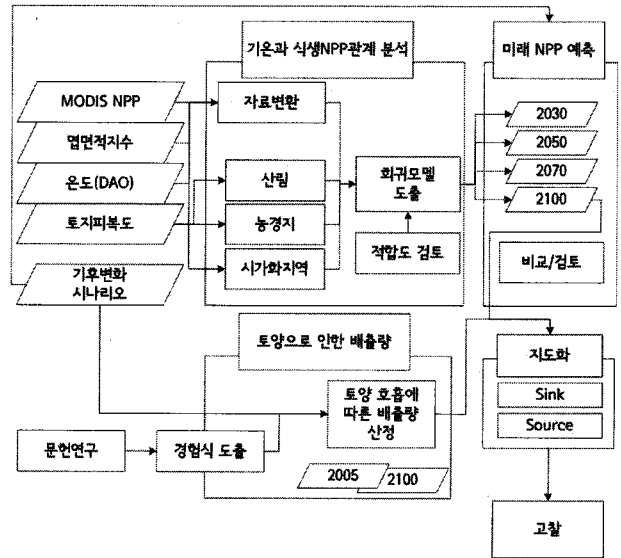


Figure 1 연구의 흐름도.

### 1. MODIS 자료

본 연구에서는 식물의 총 광합성량에서 식물의 호흡량을 뺀 순일차생산물(NPP)과 기온과의 관계를 분석하여 미래 기온변화에 따른 미래 NPP를 추정하기 위하여 MODIS 일차생산성 자료를 가공해서 제공하는 여러 항목 중 10km × 10km 해상도로 제공되는 1달간의 NPP, 엽면적지수(LAI)자료와 Data Assimilation Office(DAO)에서 제공하는 지표면 월평균 온도 자료(2000년 2월부터 2008년 12월)를 활용하였다.

### 2. 연구지역 및 기상자료

한국을 분석대상지로 선정하고 2005년 환경부에서 제공한 토지피복 중분류를 사용하였다. 현재의 기상자료 DAO에서 제공하는 2000년부터 2008년의 지표면 월평균 온도자료를 이용하였다. 미래 기후변화에 의한 기온자료는 국립기상연구소에서 제공하는 A1B시나리오를 이용하여 계산하였다. 기상청 미래 예측자료인 A1B시나리오에 나타난 평균기온은 2030년, 2050년, 2070년, 2100년 모두 2000년부터 2008년의 기온변화 특성과 유사하게 나타났

으나, 2100년으로 갈수록 온도 상승이 되는 패턴이 나타났다. 연평균 최저기온과 연평균 최고기온은 2000년부터 2008년에 나타난 기온특성보다 3도 정도 높은 것으로 나타났다(Figure 2).

### 3. 기후와 NPP와의 관계분석 및 미래예측

미래 NPP 예측 모델을 구축하기 위해 NPP와 기온, LAI, 계절적요인과의 관계분석을 실시하였다. 예측 모델은 시가화지역(시가화지역, 나지), 농경지(농경지, 초지), 산림으로 구분하여 다중회귀분석 방법을 실시하였다. 회귀분석 결과를 바탕으로 지역별, 월별 NPP 추정하는 모델의 적용 가능성을 검토하기 위하여 2000년 2월, 8월의 NPP와 추정된 NPP와의 선형회귀분석을 통해 결정계수(R<sup>2</sup>)를 도출하였다. 또한 광합성은 빛의 세기, 잎면적수 등 계절변동에 따른 영향을 받기 때문에 시계열데이터 분석법의 승법기법을 이용하여 추세변동, 순환변동 및 불규칙 변동을 파악하여 광합성이 활발하게 일어나는 시기를 구분하여 더미변수로 활용하였다. 본 연구에서는 분석결과를 바탕으로 5월부터 10월을 광합성이 활발히 일어나는 시기로 활용하였다.

미래 NPP 추정은 기상청에서 제공받은 A1B 시나리오의 미래 기온자료(2030, 2050, 2070, 2100)의 월평균 기온자료와 LAI를 이용하였다. 2030년, 2050년, 2070년, 2100년의 LAI값을 파악하기 어렵기 때문에 2000년부터 2008년의 평균값을 이용하여 미래예측을 하였다.

### 4. 기후변화에 따른 토양의 탄소배출량 분석

식생 등에 의해 토양으로 유입된 유기탄소는 토양 내 미생물의 호흡으로 인하여 배출되거나 무기탄소로 전환되어 토양 내 축적되게 된다. 본 연구에서는 탄소축적총량을 파악하기 위하여 토양 내 호흡으로 인한 탄소 배출량을 분석하였다. 토양 내 호흡은 1차적으로 토양 온도에 의해서 주도되며 이들 간에 상당히 높은 상관관계

가 있음을 보이고 있다(McHale et al. 1998, 이운영과 문형태, 2001; Schindlbacher et al., 2009). 토양유기탄소는 미생물의 분해 작용에 의해서 감소하기 때문에 일반적으로 기온 증가로 토양 내 호흡량이 증가하게 되면 토양유기탄소량은 감소하게 된다(Parshotam et al., 2001; Lal, 2004; Smith et al., 2007). 본 연구에서는 선행연구에서도 출된 모델링 식을 활용하여 기후변화에 따른 토양유기탄소의 변화량을 분석하였다. 모델링 연구에 있어 우리나라 전체 토양에 적용 가능한 실험식 및 계수가 존재하지 않아 이영희와 임희정(2009) 연구에서 사용한 산림 토심 10cm에서의 호흡량에 관한 경험식(식 1)을 사용하였다. 토양 호흡량은 미생물의 수와 비례하고 미생물의 수는 토양의 유기탄소량과 비례하기 때문에(Smith et al., 2008; Schindlbacher et al., 2009) 기본 경험식에 산림은 계수를 1로 설정하고 농경지, 초지, 시가화지역 등은 각 유기탄소량에 비례하게 설정하였다.

$$R_s = \alpha \times 0.43 \times \text{EXP}(0.11 \times T_s) \text{ - 식 (1)}$$

( $\alpha$ 는 토양특성에 따른 계수)

현재의 2000년부터 2008년까지의 유기탄소량은 유기물의 유입과 호흡으로 인한 제거가 동적균형을 이루고 있는 상태로 설정하였다. 기본적으로 본 연구에서는 토양유기탄소 유출량을 분석하기 위해 호흡이 증가하게 되면 추가적인 유기물의 공급은 없는 상태에서 토양유기탄소가 분해되어 감소하는 것으로 가정하였다.

토양유기탄소의 분해를 결정하는 토양의 온도는 Elias et al.(2004)의 대기온도에서 지표면 온도를 추정하는 추정식과 지표면 온도를 바탕으로 토양 10cm의 온도를 추정하는 방정식을 사용하였다.

현재 토양의 탄소배출량은 2005년 자료를 이용하여 분석하였고 미래 기후변화에 따른 2030년, 2050년, 2070년, 2100년 기온자료 및 2005년의 토지피복지도를 이용하여 분석하였다.

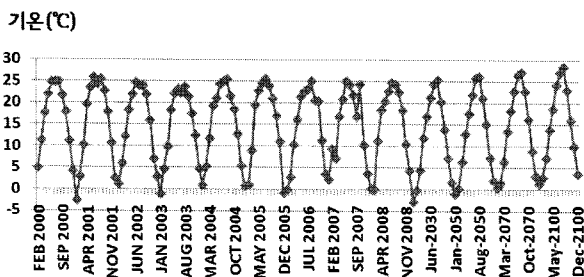


Figure 2 현재기온(DAO)와 미래기온(A1B 시나리오).

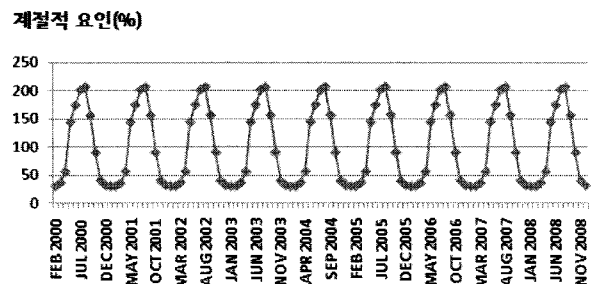


Figure 3 LAI의 순계절변동(시계열분석결과).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. NPP의 시계열적 변화와 기온과의 관계

2000년부터 2008년까지의 MODIS 영상자료로부터 가공되어 제공된 NPP를 분석한 결과 우리나라는 585gC/m<sup>2</sup>/yr에서 731gC/m<sup>2</sup>/yr의 탄소가 매년 식생에 저장되는 것으로 분석되었다. 2000년부터 2008년까지의 기온과 NPP와의 관계를 살펴본 결과 토지피복의 특성에 따라 차이는 나타나지만 우리나라의 NPP 증가는 기온증가와 상관성이 있는 것 나타났다. 기후변화로 인한 생산성의 변화는 선행연구에서도 많이 나타났으며 대체적으로 기온증가와 대기 중 이산화탄소 증가가 생산성을 높이는 것으로 나타났다(Fang et al., 2003; Cao et al., 2003). 하지만 산림지역의 경우 기온뿐만 아니라 강수량, 일조량 등의 영향도 많이 받기 때문에 이에 대한 설명력이 떨어지는 것을 파악할 수 있었다(강신규 등, 2005).

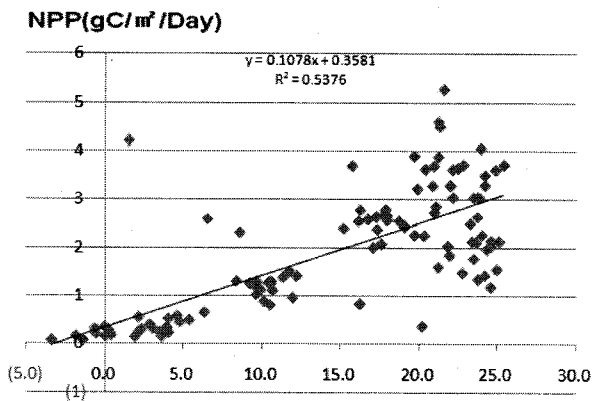


Figure 3 월평균 기온과 산림의 NPP와의 관계.

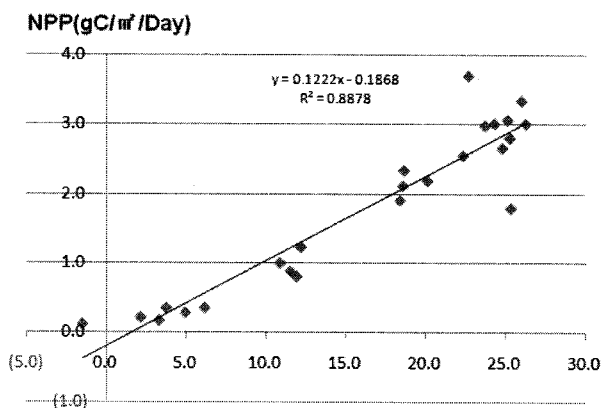


Figure 4 월평균 기온과 농경지의 NPP와의 관계.

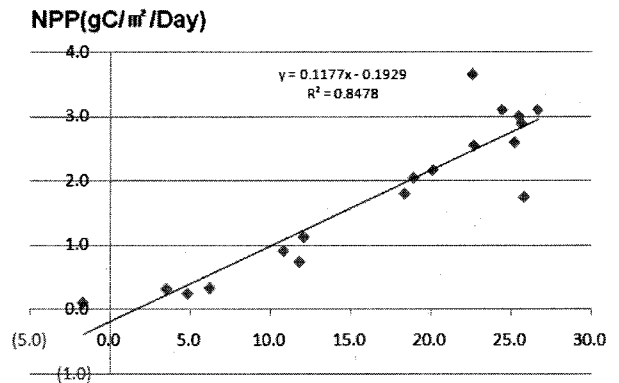


Figure 5 월평균 기온과 시가화지역의 NPP와의 관계.

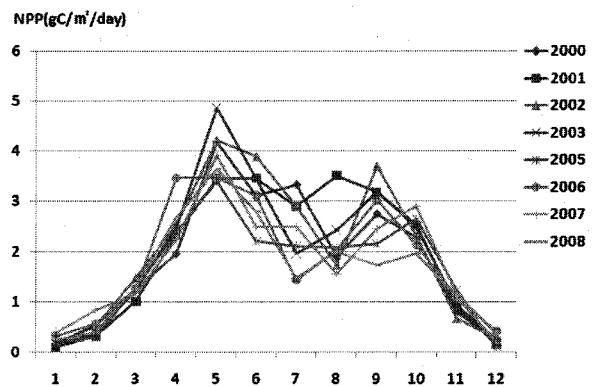


Figure 6 월별 NPP 증감현황.

#### 2. 미래 기온변화에 따른 NPP 추정

미래 NPP 추정을 위한 다중회귀분석 결과 Table 1과 같이 나타났다. 기온과 LAI의 상호작용을 변수로 추가시킨 모델이 고려되지 않은 모델보다 예측력이 더 높게 나타났다. NPP 추정 모델을 바탕으로 적용가능성을 검토하기 위하여 2001년 2월과 2001년 8월에 적용한 결과 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.52로 나타났다.

추정모델을 이용하여 미래를 예측한 결과 미래 NPP는 평균 566~610gC/m<sup>2</sup>/year으로 나타났다. 2030년부터 2100년까지 기온증가에 따라 식생에 저장되는 탄소량이 늘어난 것으로 분석되었다

미래 기온변화에 따른 탄소저장 특성을 살펴보면, 전반적인 기온 증가로 인하여 탄소저장량이 늘어난 가운데, 기온증가율이 높은 전남 서남해안, 제주도를 중심으로 식생의 탄소저장량이 늘어날 것으로 예상되었다(Figure 7). 실제로 내륙지방은 일사량과 기온이 NPP 분포에 있어서 영향을 미치는 것으로 분석된 결과가 있으며(강신규 등, 2005) 산림은 평지보다 기온이 낮고 광량이 적어 광합성을 통해서 탄소를 축적하는 양에 비해 호

흡에 사용되는 에너지가 많기 때문인 것으로 판단된다 (Zhang et al., 2009). 토지이용별로는 산림이 주로 존재하는 지역에서 40%정도 흡수되고 도시화지역, 농업지역이 우세한 지역의 수목에서 나머지 60%정도가 흡수되는 것으로 나타났다.

Table 1 NPP 추정에 사용되는 변수와의 관계(P<0.01)

토지피복	변수	비표준화계수 B	Std. E
시가화지역 (R <sup>2</sup> =0.731)	상수	-0.473	0.200
	기온	0.134	0.013
	LAI	0.844	0.231
	기온×LAI	-0.055	0.009
	더미변수*	1.111	0.273
농경지 (R <sup>2</sup> =0.725)	상수	-0.461	0.209
	기온	0.137	0.013
	LAI	0.892	0.245
	기온×LAI	-0.057	0.009
	더미변수*	1.086	0.265
산림 (R <sup>2</sup> =0.702)	상수	-0.394	0.234
	기온	0.156	0.017
	LAI	0.823	0.250
	기온×LAI	-0.056	0.009
	더미변수*	1.416	0.420

(\*5월-10월 동안 생장량 예측사 사용되는 변수임)

추정모델을 이용하여 미래를 예측한 결과 미래 NPP는 평균 566~610gC/m<sup>2</sup>/year으로 나타났다. 2030년부터 2100년까지 기온증가에 따라 식생에 저장되는 탄소량이 늘어나는 것으로 분석되었다

미래 기온변화에 따른 탄소저장 특성을 살펴보면, 전반적인 기온 증가로 인하여 탄소저장량이 늘어난 가운데, 기온증가율이 높은 전남 서남해안, 제주도를 중심으로 식생의 탄소저장량이 늘어날 것으로 예상되었다 (Figure 7). 실제로 내륙지방은 일사량과 기온이 NPP 분포에 있어서 영향을 미치는 것으로 분석된 결과가 있으며(강신규 등, 2005) 산림은 평지보다 기온이 낮고 광량이 적어 광합성을 통해서 탄소를 축적하는 양에 비해 호흡에 사용되는 에너지가 많기 때문인 것으로 판단된다 (Zhang et al., 2009). 토지이용별로는 산림이 주로 존재하는 지역에서 40%정도 흡수되고 도시화지역, 농업지역이 우세한 지역의 수목에서 나머지 60%정도가 흡수되는 것으로 나타났다.

### 3. 기후변화에 의한 토양탄소 배출량 분석

2100년에는 토양 내 미생물의 호흡으로 인하여 지역별로 최소 49gC/m<sup>2</sup>/year에서 최대 231gC/m<sup>2</sup>/year의 탄소가 공기 중으로 배출되는 것으로 나타났다. 공간적으로는 기온이 상대적으로 높은 서남해안, 수도권, 경남 등에

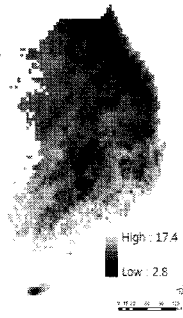


Figure 7.a. 2030년 온도

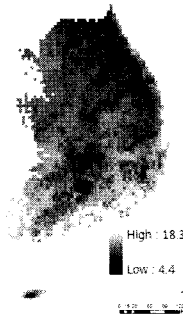


Figure 7.b. 2050년 온도

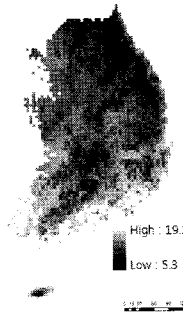


Figure 7.c. 2070년 온도

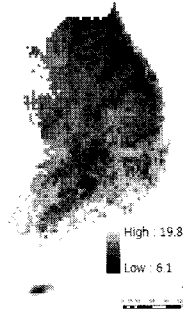


Figure 7.d. 2100년 온도

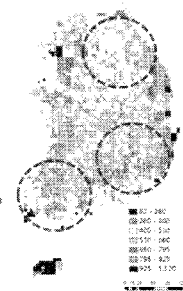


Figure 7.e. 2030년 NPP



Figure 7.f. 2050년 NPP

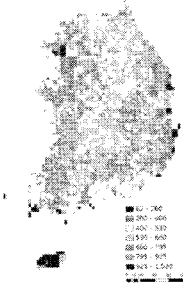


Figure 7.g. 2070년 NPP

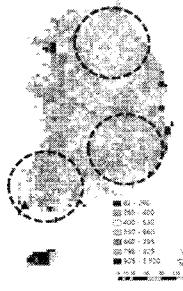


Figure 7.h. 2100년 NPP

서 호흡으로 인한 탄소 배출량이 많은 것으로 나타났다. 유기물질이 많이 유입되는 산림의 경우 기온이 높은 지역에서 탄소배출량이 많이 나타났다. 기온변화에 따라 시가화지역에서의 탄소유출량도 많은 지역별로는 제주도 및 서남해안을 중심으로 기온변화에 따른 토양유기탄소 유출량이 많은 것으로 나타났다. 2100년에는 기온변화에 의해 371,700gC/year의 토양유기탄소가 배출되는 것으로 나타났다. 이는 2030년의 269,400gC/year보다 102,300 gC/year이 늘어난 수치이며 미래 우리나라 토지이용변화로 인해 발생하는 탄소배출량 169,000gC/year의 60%에 해당한다(이동근과 박찬, 2009).

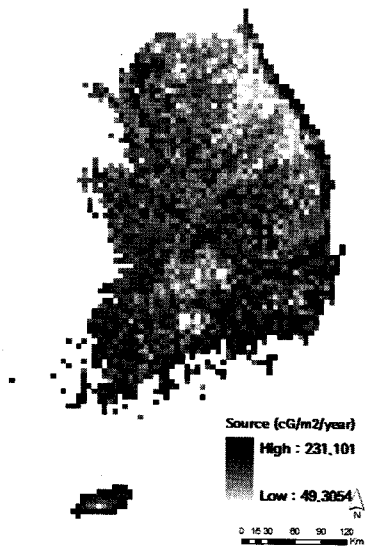


Figure 8 토양호흡으로 인한 탄소 배출량(2100년).

IPCC(2006)는 토양에 의한 흡수에 있어서 무기토양에서의 배출에 관한 기준은 정해지지 않았지만, 유기토양에서의 평균 배출량은 온대지역의 경우 68gC/m<sup>2</sup>/year으로 41 ~ 191gC/m<sup>2</sup>/year까지의 변동이 있다고 밝히고 있다. 또한 국내 광릉지역의 산림 토양에서는 토양호흡으로 200 ~ 600gC/m<sup>2</sup>/year의 탄소가 공기 중으로 배출되는 것으로 연구된 바 있다(임종환 등, 2003). Bellamy et al.(2005)의 연구에서는 과거 토양유기탄소 배출량의 22%가 기후변화에 의한 영향인 것으로 분석되었다. Bottner et al.(1995)의 연구에 의하면 토양온도가 3℃ 상승하면 20 ~ 28%의 토양유기탄소의 손실이 나타난 것으로 조사되었다. 결과적으로 기후변화의 영향으로 인하여 토양유기탄소의 유출이 발생하게 되며, 우리나라의 경우에도 지역적 편차는 존재하지만 국내·외국의 연구결과와 분석 스케일에 비추어보면 본 연구에서 도출된 연구결과가 의미 있는 것으로 판단되었다.

#### 4. 식생과 토양에서의 탄소수지의 공간적 분포

식생에 의한 탄소흡수량(NPP)과 토양으로 유입되는 탄소량 중 토양 내 미생물의 호흡에 따른 배출량을 종합적으로 고려하여 2100년의 탄소수지의 공간적 분포를 예측하였다. 미래의 서울, 인천 등을 포함한 서해안 일대의 일부 도시지역은 탄소저감량이 상대적으로 미미하였다. 2100년에는 상대적으로 강원산간지역의 탄소저감량보다 농촌이 많은 서남해안의 탄소 저감량이 클 것으로 예측되었다. 농경지역은 향후 초지, 한계농지 등으로 사용되었던 지역 중 토지이용계획의 변화로 인하여 더 많은 탄소를 저장시킬 수 있는 탄소흡수원으로 기능할 수 있을 것으로 보이며, 미래 기후변화 양상을 분석해 볼 때 기온 증가 폭이 더 크기 때문에 탄소저감 효과가 다른 지역보다 극대화 될 수 있을 것으로 보인다.

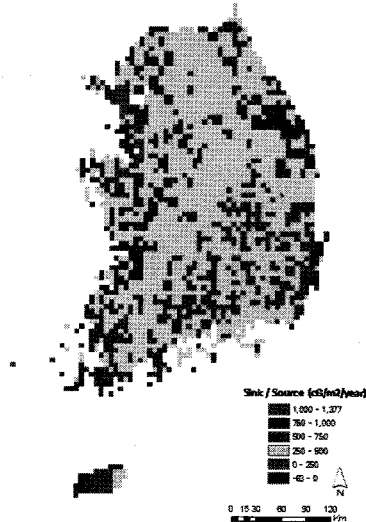


Figure 9 2100년의 탄소수지.

## IV. 결 론

본 연구에서는 MODIS 이용해서 제공된 다양한 지도를 바탕으로 기온변화에 따른 식생 탄소흐름의 미래 변화를 공간적으로 예측하였다. 추정모델을 이용하여 미래를 예측한 결과 미래 식생의 NPP는 평균 566 ~ 610gC/m<sup>2</sup>/year으로 나타났다. 2030년부터 2100년까지 기온증가에 따라 식생에 저장되는 탄소량이 늘어나는 것으로 분석되었다. 기온이 증가하게 되면 토양호흡으로 인한 배출량이 늘어나게 된다. 토양 내 미생물의 호흡으로 인하여 2100년에는 지역별로 최소 49gC/m<sup>2</sup>/year에서 최대

231gC/m<sup>2</sup>/year의 탄소가 공기 중으로 배출되는 것으로 나타났다. 미래에는 강원산간지역의 탄소저감량 보다 농경지역이 많은 서남해안의 탄소 저감량이 클 것으로 예측되었다. 서남해안의 농촌지역은 산림지역에 못지않은 탄소를 흡수하는 것으로 나타났고, 탄소흡수원으로 중요한 기능을 하고 있는 것으로 파악되었다.

향후 저탄소계획을 위해서 식생과 토양의 탄소저감효과를 극대화하기 위해서는 기후변화에 따라 변화가 많이 일어나는 지역을 중심으로 중점 관리해야 할 것으로 보인다. 특히, 낮은 지대에 존재하는 서남해안의 농경지역은 더 많은 탄소를 흡수할 수 있는 좋은 여건을 가졌기 저탄소사회를 위한 토지이용 및 관리계획에 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 저탄소계획에 있어 필요하다면 서남해안의 농경지역 중에서 농경이 어려운 초지, 한계농지 등은 탄소저감 효율의 경제성 등을 고려하여 향후 산림으로 관리하는 것도 필요하다.

본 연구는 기후변화로 인한 탄소의 흐름변화를 모델링하는 연구로 산림뿐만 아니라 농경지역, 시가지지역을 종합적으로 고려한 연구결과로 저탄소계획에 있어 유의미하게 사용될 수 있다고 사료된다. 하지만, 식생 및 토양에 의한 탄소수지 분석에 있어서 분석결과의 정확성을 높이기 위해서는 좀 더 상세한 자료를 이용하여 모델링을 수행할 필요성이 있다. 특히 MODIS 영상자료를 이용한 결과물의 신뢰도는 아직도 검증단계에 있기 때문에 MODIS 자료를 이용하는 측면에서 신뢰도를 높일 수 있는 방안들에 대한 연구도 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 향후에는 보다 정확한 식생 및 토양의 탄소수지 변화예측하기 위해서는 기후변화, 토지이용변화, 토양관리(산림경영 및 농업경작) 방법에 따른 탄소수지 변화를 종합적으로 예측하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(07첨단도시 A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 강신규, 김영일, 김영진, 2005. MODIS 총일차생산성 산출물의 오차요인 분석: 입력기상자료의 영향, 한국농림기상학회지, 7(2): 171-183.
2. 김영일, 강신규, 김준, 2007. 입력자료 개선에 의한 MODIS 총일차생산성의 신뢰도 향상, 한국농림기상학회지, 9(2): 132-139.
3. 이동근, 박찬, 2009. 토지이용변화에 따른 식생 및 토양의 이산화탄소 저감잠재량 분석. 한국환경복원녹화기술학회지, 12(2): 95-105.
4. 이영희, 임희정, 2009. 2006년 광릉 활엽수림에서 순 생태계 탄소 교환량의 모의에 대한 modified Soil-Plant-Atmosphere (mSPA) 모델의 평가, 한국농림기상학회지, 11(3): 87-99.
5. 이윤영, 문형태, 2001. 상수리나무림의 토양호흡에 관한 연구, 한국생태학회지, 24(3): 141-147.
6. 임중환, 신준환, 김광택, 천정화, 오정수, 2003. 광릉 활엽수천연림의 산림식생구조, 입지환경 및 탄소저장량, 한국농림기상학회지, 5(2): 101-109.
7. Bellamy, P. H., Loveland, P. J., Bradley, R. I., Lark, R. M., and Kirk, G. J. D. 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. Nature 437, 245-248.
8. Bottner, P., Couteaux, M.M., Vallejo, V.R., 1995. Soil organic matter in Mediterranean-type ecosystems and global climate changes: a case study-the soils of the Mediterranean Basin. In: Moreno, J.M., Oechel, W.C. (Eds.), Global Change and Mediterranean Type Ecosystems. Springer-Verlag, New York, 306-325.
9. Elias EA., Cichota R., Torriani HH., and Lier QJ., 2004. Analytical soil-temperature model: Correction for temporal variation of daily amplitude Soil Science Society of America, 68: 784-788.
10. Heinsch, F. A., M. Reeves, P. Votava, S. Kang, C. Milesi, M. Zhao, 2003: User's guide. GPP and NPP (MOD17A2/A3) products, NASA MODIS Land Algorithm 1-57.
11. Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science 304, 1623-1627.
12. Parshotam A., Saggarr S., Tate K., and Parfitt R. 2001. Modelling organic matter dynamics in New Zealand soils, Environment International, 27: 111-119.
13. Rounsevell, M. D. A., Ewert, F., Reginster, I., Leemans, R. and Carter, T. R. 2005. Future scenarios of European agricultural land use. II. Projecting changes in cropland and grassland, Agriculture Ecosystem and Environment, 107(1-2): 117-135.
14. Running, S. W., D. Baldocchi, D. Turner, S. T. Gower, P. Bakwin, and K. Hibbard, 1999: A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes,

- flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment* 70, 108-127.
15. Schwaiger HP., and Bird DN. Integration of albedo effects caused by land use change into the climate balance: Should we still account in greenhouse gas units? *Forest Ecology and Management*(in press).
  16. Smith, J. U., Smith, P., Wattenbach, M., Zaehle, S., Hiederer, R., Jones, R. J. A., Montanarella, L., Rounsevell, M. D. A., Reginster, I. and Ewert, F. 2005. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990-2080, *Global Change Biology*, 11(12): 2141-2152.
  17. Smith, P., Fang, C., Dawson, J.J.C., Moncrieff, J. B. 2008. Impact of Global Warming on Soil Organic Carbon, *Advances in Agronomy*, 97: 1-43.
  18. Zhao S., Liu S., Yin R., Li Z., Deng Y., Tan K., Deng X., Rothstein D., Qi J. 2010. Quantifying Terrestrial Ecosystem Carbon Dynamics in the Jinsha Watershed, Upper Yangtze, China from 1975 to 2000, *Environmental Management*, 45(3): 466-475.

---

접 수 일: (2010년 11월 8일)

수 정 일: (1차: 2010년 12월 1일, 2차: 12월 13일)

게재확정일: (2010년 12월 13일)

■ 3인 익명 심사필