

국립생태원 캠퍼스 내 주요 식생의 탄소수지

김경순 · 임윤경 · 안지홍 · 이재석¹ · 이창석^{2,*}

서울여자대학교 대학원 생물학과, ¹건국대학교 생명과학특성학부, ²서울여자대학교 생명환경공학과

Carbon Budget in Campus of the National Institute of Ecology. Kim, Gyung Soon, Yun Kyung Lim, Ji Hong An, Jae Seok Lee¹ and Chang Seok Lee^{2,*} (Department of Biology, Graduate School of Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea; ¹Department of Biological Sciences, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ²Department of Bio and Environment Technology, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea)

Abstract This study was conducted to quantify a carbon budget of major vegetation types established in the campus of the National Institute of Ecology (NIE). Carbon budget was measured for *Pinus thunbergii* and *Castanea crenata* stands as the existing vegetation. Net Primary Productivity (NPP) was determined by applying allometric method and soil respiration was measured by EGM-4. Heterotrophic respiration was calculated as 55% of total respiration based on the existing results. Net Ecosystem Production (NEP) was determined by the difference between NPP and heterotrophic respiration (HR). NPPs of *P. thunbergii* and *C. crenata* stands were shown in 4.9 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ and 5.3 ton C ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. Heterotrophic respirations of *P. thunbergii* and *C. crenata* stands were shown in 2.4 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ and 3.5 ton C ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. NEPs of *P. thunbergii* and *C. crenata* stands were shown in 2.5 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ and 1.8 ton C ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. Carbon absorption capacity for the whole set of vegetation types established in the NIE was estimated by applying NEP indices obtained from current study and extrapolating NEP indices from existing studies. The value was shown in 147.6 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ and it was calculated as 541.2 ton CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ converted into CO₂. This function corresponds to 62% of carbon emission from energy that NIE uses for operation of various facilities including the glass domes known in Ecorium. This carbon offset capacity corresponds to about five times of them of the whole national territory of Korea and the representative rural area, Seocheon-gun. Considered the fact that ongoing climate change was originated from imbalance of carbon budget at the global level, it is expected that evaluation on carbon budget in the spatial dimension reflected land use pattern could provide us baseline information being required to solve fundamentally climate change problem.

Key words: carbon budget, heterotrophic respiration, Net Ecosystem Production (NEP), National Institute of Ecology (NIE), Net Primary Productivity (NPP)

Manuscript received 17 July 2014, revised 15 September 2014,
revision accepted 16 September 2014
* Corresponding author: Tel: +82-2-970-5822, Fax: +82-2-970-5822,
E-mail: leecs@swu.ac.kr

서론

기후변화를 완화시키기 위해 국내외적으로 다양한 노력이 이루어지고 있다. IPCC는 지구적 차원에서 인위적 탄소배출량을 제한하려고 노력하고 있고, 우리나라에서는 2012년 탄소배출권 거래제 시행령을 입법 예고하였으며, 2015년부터 탄소배출권 거래제를 시행할 예정으로 탄소배출에 대한 실제적 조치에 돌입하였다.

국립생태원은 기후변화에 따른 생태계 변화를 중점적으로 연구하고, 생태관련 각종 연구, 교육 및 전시를 목적으로 설립되었다(NIE, 2012). 따라서 이러한 목적을 달성하기 위해 연구, 교육 및 전시 시설로 이루어진 인위적 공간과 자연 지역 사이의 생태적 균형 유지는 국가의 생태연구를 선도할 이 기관의 위상 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

국립생태원은 기관 고유 업무에 부응하고, 나아가 기후변화 완화를 위한 국내외적 노력에 호응하기 위해 캠퍼스 내의 각종 시설을 운영하는 과정에서 배출되는 탄소배출량을 산정하고 부지가 보유한 생태계의 탄소흡수량을 산출한 후 이를 통해 부지 전체의 탄소수지를 평가하여 탄소수지 차원의 지속가능한 토지이용을 실천함으로써 해당분야 선도 기관으로 자리매김할 계획을 수립한 바 있다(NIE, 2012).

원래 균형을 유지하던 지구적 차원의 탄소수지가 과도한 화석연료 사용과 토지이용 변화로 균형을 상실하

며 기후변화를 주도하고 있다(Houghton, 1995; UNEP, 2009). 기후변화를 주도하는 CO₂ 농도는 지구적 차원은 물론 국지적 차원에서도 지속적으로 증가하는 추세에 있지만 그것의 연 변화는 뚜렷한 계절현상으로 보여 겨울에 높고 여름에 낮다(Amthor, 1995; Park *et al.*, 2013). 이것은 온대지역의 숲이 이산화탄소의 고정원(sink)으로 작용한 결과이다(Barbour *et al.*, 1999). 또 Eddy 공분산법을 적용하여 토지이용 유형이 다른 두 지소의 탄소흐름을 분석한 결과(Park *et al.*, 2013)는 도시의 주거지역과 자연공원지역이 탄소수지에서 각각 발생원(source)과 고정원으로 기능하고 있음을 분명하게 보여주고 있다. 이런 점에서 이제 우리는 기후변화 문제를 접근하는데 있어서 우리의 사고를 바꾸어야 할 것으로 판단된다. 기후변화를 비롯하여 모든 환경문제에는 발생원과 고정원이 있다. 우리는 환경문제를 발생원을 줄여서 해결할 수도 있지만 고정원을 늘려서 해결할 수도 있다. 기존의 해결책으로서 전자는 주로 공학기술에 근거하고, 후자는 생태적 해결책으로서 생태계서비스 기능에 토대를 둔다(Amichev *et al.*, 2008; Palmer *et al.*, 2014). 이런 점에서 본 연구가 시도하는 공간차원의 탄소수지 평가는 생태학적 측면의 기후변화 해결책의 토대를 닦는 연구로서 큰 의미를 부여할 수 있다.

기후변화에 따른 생태계 변화는 생태계가 갖는 물질순환과 에너지 흐름 같은 기능적인 변화를 수반한다. 이러한 기능적인 변화 중 대기-식생-토양 사이에 일어나는 탄소의 순환은 미래의 기후변화 추이에도 매우 높은

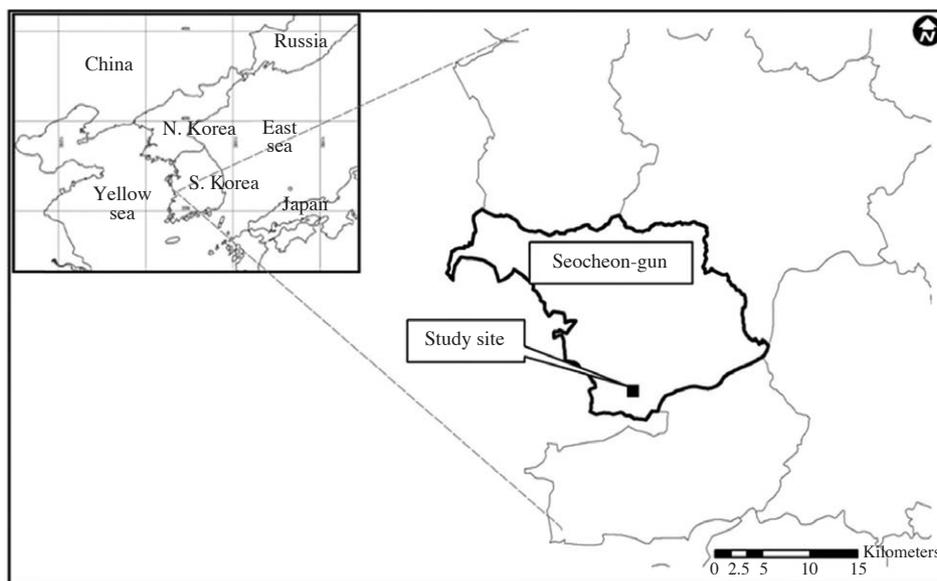


Fig. 1. A map showing the geographical location of the study site, the National Institute of Ecology.

관련성을 가지고 있다(Cox *et al.*, 2000; Prentice *et al.*, 2001).

생태계의 탄소순환은 생산자인 식물이 광합성을 통해 대기의 탄소를 식생에 고정하는 것으로부터 시작되며, 고정된 탄소는 고사목, 낙엽, 낙지 등을 통해 토양으로 공급되어 일부는 분해를 거쳐 대기로 환원되고, 일부가 토양에 축적되는 흐름을 가진다. 다양한 식생에 대한 생태계 순생산량을 정량하고 탄소순환기능을 파악하기 위해서는 식생, 토양, 대기로 이어지는 여러 단계의 탄소 흐름에 대한 정량이 필요하다. 대기로부터의 탄소 흡수와 토양으로부터의 방출 결과를 종합하면 어떤 생태계가 가지는 순수한 탄소흡수량(순생태계생산량)이 계산된다(Joo *et al.*, 2011).

본 연구는 이와 같은 생태계 탄소순환체계를 기준으로 토양이 방출하는 이산화탄소량과 그곳에 성립된 식물군락 별 순생산량을 측정하여 주요 식생 유형의 탄소 축적량과 순생태계생산량을 정량하기 위해 수행하였다. 또한 이를 근거로 국립생태원부지 전체의 순생태계생산량(NEP, Net Ecosystem Production)을 정량화하여 국립생태원 부지가 갖는 탄소수지를 파악하고자 시도하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

국립생태원은 충남 서천군 마서면 도삼리 및 송내리 일원(N36°02'09", E126°43'08")에 위치한다(Fig. 1). 서천군은 충청남도 서남단에 위치하고 있으며, 동은 부여군, 북은 보령시, 남은 금강을 경계로 전라북도 군산시를 대안하고, 서는 황해와 접하여 위치하고 있다. 지형적으로 이 지역은 차령산맥의 말단부가 위치한 북부 지역을 제외하면 대부분 평탄한 평야지대로 구성되어 있다. 구릉지는 대부분 해발고가 낮은 야산이고, 면적이 광대하여 전작지대로 변모해 있으며, 평야는 하천 유역인 남쪽의 금강 연안과 서쪽의 황해 연안에 분포하고 있다.

이 지역은 바다에 인접하여 곶술군락이 차지하는 면적이 넓고, 해발 100 m 이내로 고도가 낮고 경사가 완만하여 성립된 식생은 대부분 인간 간섭에 노출되어 있다. 따라서 곶술군락 다음으로는 인위적으로 조성된 밤나무군락이 넓은 면적을 차지하고 있다(Table 1). 그 밖에 우리나라 전통 마을의 전형적인 모습과 같이(Lee *et al.*, 2011) 인가 주변으로 상수리나무군락이 성립해 있다(Fig. 2).

Table 1. Composition of landscape elements identified by classifying the landscape ecological map of the National Institute of Ecology.

Vegetation type	Area (m ²)	Percent (%)
Existing vegetation		
<i>Castanea crenata</i>	91,618	9.1
<i>Pinus thunbergii</i>	170,272	17.0
<i>Quercus acutissima</i>	18,011	1.8
Introduced vegetation		
<i>Abies koreana</i>	833	0.1
<i>Abies hollophylla</i>	3,474	0.3
<i>Camellia japonica</i>	4,338	0.4
<i>Carpinus laxiflora</i>	1,894	0.2
<i>Carpinus tschonoskii</i>	4,928	0.5
<i>Pinus densiflora</i>	12,344	1.2
<i>Pinus koraiensis</i>	1,157	0.1
<i>Pseudosasa japonica</i>	6,874	0.7
<i>Quercus acuta</i>	751	0.1
<i>Quercus mongolica</i>	10,818	1.1
<i>Quercus serrata</i>	5,020	0.5
<i>Quercus variabilis</i>	9,981	1.0
<i>Salix koreensis</i>	7,771	0.8
<i>Zelkova serrata</i>	3,386	0.3
Developed area		
Built-in area	188,040	18.7
Parking lot	54,879	5.5
Others		
Lawn	20,006	2.0
Nursery garden	33,664	3.3
Orchard	1,924	0.2
Grassland	141,553	14.1
Garden	17,176	1.7
Water body	70,827	7.0
Wetland	124,821	12.4
Total	1,006,360	100.0

2. 식생도 작성

식생도는 2009년 9월과 2014년 6월에 상관식생도(physiognomic map)로 작성하였다. 식생도 작성을 위해 Google Earth에서 제공하는 인공위성사진에서 균질한 상태로 출현하는 식생단위를 구분한 후(image interpretation), 이를 현지에서 확인하는 작업(ground truth)을 거쳤다. GIS 프로그램(ArcGIS 9.3; ESRI 2005)을 이용하여 구분된 식생단위를 1:25,000 수치지형도와 중첩시켜 지도 체계화하였다.

3. 식생의 순생산량 측정

식생의 순생산량(NPP, Net Primary Productivity)을 측정하기 위한 상대생장식은 기존의 것을 이용하였다(Korea Forest Research Institute 2010). 곶술의 상대생장식은 식 1과 같다.

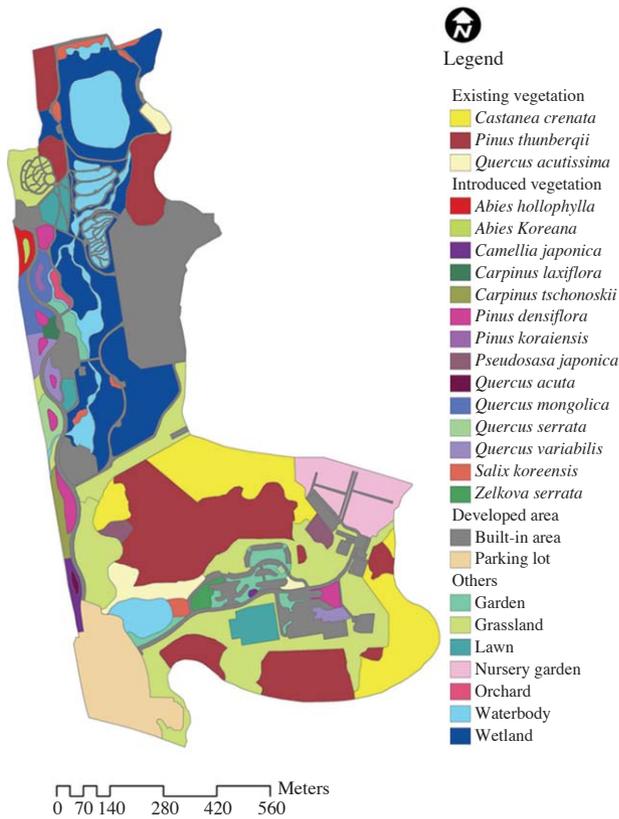


Fig. 2. A map showing the vegetation and the land use types of the study site, the National Institute of Ecology. Field survey was carried out in 2009 and 2014.

$$\text{생물량} = 233.940D^{2.25676} \quad (\text{식 1})$$

(D: 흉고직경, cm)

밤나무의 상대생장식은 유사한 생장패턴을 보이는 상수리나무의 상대생장식으로 대응하였고 그 식은 식 2와 같다.

$$\text{생물량} = 421.731D^{2.19347} \quad (\text{식 2})$$

(D: 흉고직경, cm)

식물군락별 순생산량을 산출하기 위해 지역을 대표하는 식생인 곰솔군락과 밤나무군락지에 20m×20m 크기의 방형구를 설치한 후 2010년 9월에 방형구 내에 출현하는 흉고직경 2cm 이상인 교목성 식물의 흉고직경을 측정 후 상대생장식을 이용하여 현존량(W1)을 산정하였다. 이듬해인 2011년 8월에 다시 흉고직경을 측정 후 이를 상대생장식에 대입하여 현존량(W2)을 재 산정하였다. 양 현존량으로부터 증가량(ΔW=W2-W1)을 산출하여 연 순생산량으로 삼았다. 탄소의 양은 IPCC (2001)의 탄소전환계수를 이용하여 추정하였고, 이를 이

산화탄소량으로 환산하였다(Han, 2002).

흉고직경은 직경 테이프(Diameter tape; KOBIC, Korea)를 이용하여 측정하였다.

4. 토양호흡량 측정

토양호흡은 야외현장에서 비교적 측정이 편리하고 측정치가 정확한 closed dynamic chamber method를 적용하여 측정하였다(Bekku *et al.*, 1997). 본 연구에서는 토양호흡측정용 chamber (SRC-1, PP Systems, UK)가 장착된 휴대용 IRGA (Infrared gas analyzer, EGM-4, PP Systems, UK)를 이용하여 토양호흡을 측정하였다.

2011년 8월 초 곰솔군락과 밤나무군락의 순생산량을 측정하기 위하여 설치한 방형구(20×20 m) 내부에 지속적으로 토양호흡을 측정하기 위해 6개의 보조 방형구(1×1 m) 지점을 무작위로 선정하였다. 직경 10cm의 PVC관을 8cm 길이로 절단하여 제작한 토양호흡측정용 collar (지름 10cm, 높이 8cm)를 각 보조 방형구 안에 3cm 깊이로 심었다. 동시에 collar 내부의 식생들을 모두 제거하였다.

토양호흡 속도는 2011년 8월부터 2012년 7월까지 12개월 동안 정기적으로 매월 한 번 측정을 원칙으로 하루 중 10:00~13:00 사이에 측정하였다. 토양호흡량의 계산은 CO₂ 농도 측정 센서가 부착된 chamber를 collar에 장착한 상태에서 밀폐된 collar와 chamber의 공간 내 공기의 CO₂ 농도 변화를 2분 동안 2초 간격으로 측정하여 시간 변화에 따른 CO₂ 농도의 증가 속도로 계산하였다. 토양 표면에서 방출되는 CO₂ 농도의 증가속도로부터 토양호흡을 계산하는 방법은 식 7과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Soil respiration rate (mg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}) &= 3600 \cdot 10^{-6} \cdot a \cdot \rho \cdot V \cdot S^{-1} \quad (\text{식 7}) \\ a: &\text{ chamber 내의 CO}_2\text{ 농도 변화율 (}\mu\text{mol mol}^{-1}\text{ s}^{-1}) \\ \rho: &\text{ 공기의 CO}_2\text{ 밀도 (mg m}^{-3}) \\ V: &\text{ chamber의 부피 (m}^3) \\ S: &\text{ collar로 덮인 토양 표면적 (m}^2) \end{aligned}$$

생태계순생산량을 구하기 위해 필요한 토양의 종속영양생물 호흡량은 산림토양에서 인용되고 있는 토양호흡량에 종속영양생물 호흡 계수 0.55를 곱하여 구하고, 뿌리호흡량은 전체 토양호흡량으로부터 종속영양생물 호흡량을 차감하여 계산하였다(Raich and Tufekcioglu, 2000; Lee, 2003).

5. 생태계순생산량

생태계순생산량 (NEP, Net Ecosystem Production)은

Table 2. Density, DBH, height and basal area of *Pinus thunbergii* stand.

Species	Density (N/ha)	2011		2012		NPP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
		Mean DBH	Biomass	Mean DBH	Biomass	
<i>Pinus thunbergii</i>	819	21.1	215.2	21.3	219.3	4.1
<i>Castanea crenata</i>	294	10.2	17.3	10.4	17.9	0.6
<i>Quercus serrata</i>	131	5.4	1.6	5.6	1.7	0.1
<i>Alnus sibirica</i>	50	7.9	1.5	8.1	1.5	0.0
<i>Prunus serrulata</i>	19	9.3	0.8	9.5	0.9	0.1
<i>Pinus koraiensis</i>	6	8.8	0.2	9	0.2	0.0
Total	1,319	—	236.6	—	241.5	4.9

Table 3. Density, DBH, height and basal are of *Castanea crenata* stand.

Species	Density (N/ha)	2011		2012		NPP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
		Mean DBH	Biomass	Mean DBH	Biomass	
<i>Castanea crenata</i>	781	14.4	135.5	14.6	139.8	4.3
<i>Quercus serrata</i>	550	5.4	13.1	5.6	13.7	0.6
<i>Alnus sibirica</i>	94	8.7	5.1	8.9	5.3	0.2
<i>Quercus variabilis</i>	31	14.8	5.9	14.9	6.0	0.1
<i>Quercus aliena</i>	6	7	0.2	7.5	0.2	0.0
<i>Albizia julibrissin</i>	6	6.8	0.2	6.9	0.2	0.0
<i>Sorbus alnifolia</i>	119	4.2	1.3	4.4	1.4	0.1
<i>Styrax japonicus</i>	13	11.8	1.7	11.9	1.7	0.0
Total	1,600	—	163.0	—	168.3	5.3

식물군락에 의한 CO₂ 흡수량(NPP, Net Primary Productivity)과 토양의 중속영양생물의 호흡에 의한 CO₂ 배출량 사이의 차이로 구하였다.

6. 국립생태원 캠퍼스의 탄소수지

생태계의 이산화탄소 흡수량은 대기 중 이산화탄소의 주요 흡수원으로 밝혀진 산림을 대상으로 산정하였다(Dixon *et al.*, 1994; Fang *et al.*, 2005). 본 연구장소에서 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 곰솔군락과 밤나무군락의 생태계순생산량 지수는 본 연구를 통해 얻은 지수를 사용하였고, 다른 군락의 지수는 기존 연구로부터 얻은 지수를 대용하였다(Table 7). 이때 전나무군락, 구상나무군락 및 잣나무군락은 소나무군락의 생태계순생산량 지수, 동백나무군락, 붉가시나무군락, 서어나무군락, 개서어나무군락 및 느티나무군락은 상수리나무군락의 지수, 이대군락은 버드나무군락의 지수, 졸참나무군락과 굴참나무군락은 신갈나무군락의 지수, 그리고 정원, 초지, 잔디밭, 과수원 및 양묘장은 아파트정원의 지수를 생태계순생산량 지수로 사용하였다.

식물군락의 이산화탄소 흡수량은 각 식물군락의 면적에 생태계순생산량 지수를 곱하여 구하였다. 국립생태원의 이산화탄소 배출량은 국립생태원 건립추진기획단 자

료를 사용하였다(NIE, 2012).

결 과

1. 국립생태원 캠퍼스의 경관구조

국립생태원 캠퍼스의 식생 및 토지이용 유형을 보여주는 경관생태지도를 Fig. 2에 나타내었고, 출현 경관요소들의 면적을 Table 1에 나타내었다. 이 지역은 해발고도 100 m 이하의 구릉지와 평지가 대부분을 차지하는 장소로서 건축공간이 차지하는 면적이 가장 넓었고(18.8 ha), 곰솔군락, 초지, 습지, 밤나무군락 등이 넓은 면적을 차지하였다.

본 경관생태지도를 분석하여 얻은 식생유형별 면적을 그들의 탄소흡수능 정산에 사용하였다.

2. 순생산량

국립생태원 캠퍼스에 성립된 곰솔군락을 이루는 직경 2 cm 이상인 교목성 식물의 밀도, 흉고직경, 수고 및 생물량을 Table 2에 나타내었다. 2010년 이 군락을 이루는 모든 식물의 생물량은 236.6 ton C ha⁻¹이었고, 1년 후

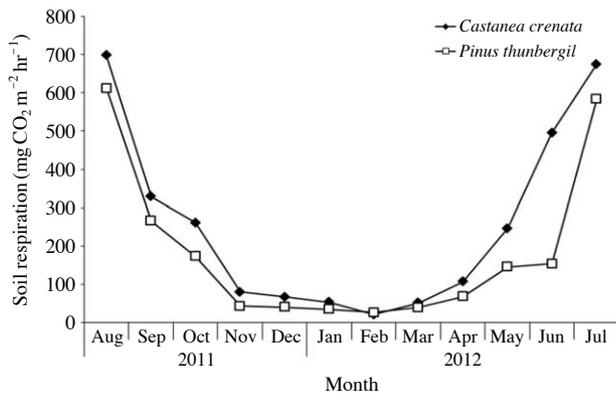


Fig. 3. Seasonal variation of monthly mean soil respiration rate of *Pinus thunbergii* and *Castanea crenata* stands.

Table 4. Soil respiration rate of *Pinus thunbergii* and *Castanea crenata* stands.

Stand	Total soil respiration (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Heterotrophic respiration (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Root respiration (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
<i>Pinus thunbergii</i>	4.4	2.4	2.0
<i>Castanea crenata</i>	6.3	3.5	2.8

측정한 생물량은 241.5 ton C ha⁻¹로서 곰솔군락의 순생산량은 4.9 ton C ha⁻¹ yr⁻¹으로 나타났다 (Table 2).

밤나무군락을 이루는 직경 2cm 이상인 교목성 식물의 밀도, 흉고직경, 수고 및 생물량을 Table 3에 나타내었다. 2010년 이 군락을 이루는 모든 식물의 생물량은 163.0 ton C ha⁻¹이었고, 1년 후 측정된 생물량은 168.3 ton C ha⁻¹로서 밤나무군락의 순생산량은 5.3 ton C ha⁻¹ yr⁻¹으로 나타났다 (Table 3).

3. 토양호흡량

곰솔군락과 밤나무군락의 연간 토양호흡량 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 토양호흡량의 계절 변화는 양 군락에서 모두 여름에 가장 높고 겨울에 낮은 전형적인 계절 변화 양상을 나타내었다. 곰솔군락의 토양호흡량은 26.2~612.5 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 범위로 나타났고, 밤나무군락의 것은 20.4~698.4 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 범위로 나타났다.

곰솔군락과 밤나무군락의 연간 토양호흡량은 각각 4.4 ton C ha⁻¹ yr⁻¹과 6.3 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타났다 (Table 4).

4. 생태계순생산량

곰솔군락과 밤나무군락의 생태계순생산량은 각각 2.5 ton C ha⁻¹ yr⁻¹과 1.8 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타났다 (Table 5).

Table 5. NEP (Net Ecosystem Production) of *Pinus thunbergii* and *Castanea crenata* stands.

Stand	NPP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Heterotrophic respiration (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	NEP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
<i>Pinus thunbergii</i>	4.9	2.4	2.5
<i>Castanea crenata</i>	5.3	3.5	1.8

Table 6. Carbon and CO₂ absorption capacity of forest vegetation established in National Institute of Ecology.

Vegetation type	Area (m ²)	Carbon absorption (ton C yr ⁻¹)	CO ₂ absorption (ton CO ₂ yr ⁻¹)
Needle-leaved	170,272	42.6	156.1
Broad-leaved	91,618	16.5	60.5
Total	261,890	59.1	216.6

5. 국립생태원 캠퍼스 내 자연식생의 이산화탄소 흡수능

곰솔군락과 밤나무군락을 각각 국립생태원 캠퍼스 내 침엽수림과 활엽수림을 대표하는 식생으로 가정하고 그들 식생으로부터 얻은 생태계순생산량 지수를 대입하여 국립생태원 내 기존식생의 탄소흡수량을 산정한 결과, 침엽수림과 활엽수림의 탄소흡수량은 각각 42.6 ton C yr⁻¹ 및 16.5 ton C yr⁻¹으로서 총 59.1 ton C yr⁻¹으로 나타났다. 이를 이산화탄소흡수량으로 환산하면 각각 156.1 ton CO₂ yr⁻¹ 및 60.5 ton CO₂ yr⁻¹으로서 총 216.6 ton CO₂ yr⁻¹으로 나타났다 (Table 6).

고 찰

1. 국립생태원 곰솔군락과 밤나무군락의 탄소흡수능

국립생태원 캠퍼스에 성립된 곰솔군락과 밤나무군락의 순생산량(NPP)은 각각 4.9 ton C ha⁻¹ yr⁻¹과 5.3 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타났다 (Tables 2 and 3). 곰솔군락의 순생산량을 국내에서 조사된 소나무군락의 자료와 비교하였을 때 (1.85~9.40 ton C ha⁻¹ yr⁻¹; Park and Lee, 1990; MOE, 2010, 2011), 그 값은 중간 값 수준을 유지하였다.

밤나무군락의 순생산량을 우리나라 산림생태계에서 측정된 활엽수림의 순생산량과 비교하면 (1.5~12.4 ton C ha⁻¹ yr⁻¹; Kim and Jeong, 1985), 그 값 역시 중간 값 수준을 유지하였다.

국립생태원 곰솔군락과 밤나무군락의 토양호흡량은

Table 7. Carbon and CO₂ absorption capacity the whole set of vegetation types established in the National Institute of Ecology in the future.

Vegetation type	Area (m ²)	NEP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Carbon absorption (ton C yr ⁻¹)	CO ₂ absorption (ton CO ₂ yr ⁻¹)	NEP index
Existing vegetation					
<i>Pinus thunbergii</i>	170,272	2.5	42.6	156.1	Current study
<i>Castanea crenata</i>	91,618	1.8	16.5	60.5	Current study
<i>Quercus acutissima</i>	18,011	7.6	13.7	50.1	MOE, 2011
Introduced vegetation					
<i>Abies hollophylla</i>	3,474	2.7	0.9	3.4	MOE, 2011
<i>Abies koreana</i>	833	2.7	0.2	0.8	MOE, 2011
<i>Camellia japonica</i>	4,338	7.6	3.3	12.1	MOE, 2011
<i>Carpinus laxiflora</i>	1,894	7.6	1.4	5.2	MOE, 2011
<i>Carpinus tschonoskii</i>	4,928	7.6	3.8	13.8	MOE, 2011
<i>Pinus densiflora</i>	12,344	2.7	3.3	12.2	MOE, 2011
<i>Pinus koraiensis</i>	1,157	2.7	0.3	1.2	MOE, 2011
<i>Pseudotsuga japonica</i>	6,874	9.6	6.6	24.4	MOE, 2011
<i>Quercus acuta</i>	751	7.6	0.6	2.1	MOE, 2011
<i>Quercus mongolica</i>	10,818	2.2	2.4	8.7	MOE, 2011
<i>Quercus serrata</i>	5,020	2.2	1.1	4.1	MOE, 2011
<i>Quercus variabilis</i>	9,981	2.2	2.2	8.1	MOE, 2011
<i>Salix koreensis</i>	7,771	9.6	7.5	27.5	Han <i>et al.</i> , 2010
<i>Zelkova serrata</i>	3,386	7.6	2.6	9.4	MOE, 2011
Others					
Garden	17,176	1.8	3.1	11.3	MOE, 2011
Grassland	141,553	1.8	25.5	93.4	MOE, 2011
Lawn	20,006	1.8	3.6	13.2	MOE, 2011
Orchard	1,924	1.8	0.4	1.3	MOE, 2011
Nursery garden	33,664	1.8	6.1	22.2	MOE, 2011
Total	567,793	97.4	147.6	541.2	

각각 182.2 mg CO₂ m⁻² h⁻¹와 256.9 mg CO₂ m⁻² h⁻¹으로 나타나 밤나무군락이 곱솔군락 보다 높게 나타났다(Fig. 3). 이는 밤나무군락의 임분 밀도(1,600 본 ha⁻¹)가 곱솔군락의 밀도(1,319 본 ha⁻¹)보다 높아 그 뿌리의 양에서도 차이가 있기 때문으로 판단된다(Kucera and Kirkham, 1971; Litton *et al.*, 2004). 곱솔군락의 토양호흡량을 국내의 소나무군락에서 측정된 값(162.7~317.0 mg CO₂ m⁻² h⁻¹; MOE, 2011)과 비교하면 비교적 낮은 범위에 속하였다. 밤나무군락의 토양호흡량을 국내의 상수리나무군락에서 측정된 값(332.0~493.2 mg CO₂ m⁻² h⁻¹; MOE, 2011; Yu, 2011; Lee *et al.*, 2012)과 비교하면, 해당범위를 벗어날 정도로 낮았다. 이처럼 양 식물군락의 토양호흡량이 국내의 다른 지역에서 측정된 값보다 낮은 것은 본 조사지역이 고도가 낮고 경사가 완만한 지역이고 더구나 인가에 인접한 지역으로서 잦은 인간 간섭에 노출된 데 기인하는 것으로 판단된다(Lee *et al.*, 2011).

순생산량과 토양 내 중속영양생물의 호흡량을 차감 계산하여 얻은 순생태계생산량은 곱솔군락과 밤나무군락에서 각각 2.5 ton C ha⁻¹ yr⁻¹과 1.8 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로

나타났다(Table 5). 곱솔군락의 순생태계생산량(NEP)은 청주(2.3 ton C ha⁻¹ yr⁻¹) 및 여수(2.7 ton C ha⁻¹ yr⁻¹) 지역의 소나무군락과 유사한 값을 보였다(MOE, 2011). 밤나무군락의 경우, 청주(7.6 ton C ha⁻¹ yr⁻¹) 및 여수(5.2 ton C ha⁻¹ yr⁻¹) 지역의 상수리나무군락 보다 크게 낮았다(MOE, 2011). 그러나 양 식물군락의 생태계순생산량은 세계 여러 나라의 온대림에서 조사된 값의 범위(-1.24~5.08 ton C ha⁻¹ yr⁻¹; Tyrrell *et al.*, 2012)에 포함되었다. 곱솔군락의 높은 생태계순생산량은 이 군락이 아직 발달 중에 있는 데 기인한다(Pregitzer *et al.*, 2008). 반면에 밤나무군락의 낮은 생태계순생산량은 이 군락이 쇠퇴단계에 접어든 것과 관계된다. 실제로 Lim(2014)은 이 밤나무군락이 졸참나무가 우점하는 군락으로 천이가 진행되고 있음을 밝힌 바 있다.

2. 국립생태원에 성립된 식생 전체의 탄소흡수능

본 연구를 통해 얻은 곱솔군락과 밤나무군락의 생태계순생산량 지수를 기본으로 삼고, 국립생태원 건립을 위해 도입된 식생의 경우는 아직 정착이 완료되지 않은

관계로 다른 연구를 통해 얻은 생태계순생산량 지수를 대입하여 국립생태원에 성립된 식생 전체의 탄소흡수능을 평가하였다(Table 7). 평가 결과 국립생태원에 성립된 식생의 탄소흡수량과 이산화탄소 흡수량은 각각 $147.6 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 과 $541.2 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 나타났다. 한편, 국립생태원에서 사용할 에너지량으로부터 산출된 이산화탄소 배출량은 $870 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 산정되었다(NIE, 2012). 양 결과를 종합하면 국립생태원 캠퍼스는 국립생태원 운영을 위해 배출되는 이산화탄소의 약 62%를 흡수할 수 있는 것으로 평가되었다. 이러한 탄소흡수능은 국가 전체의 이산화탄소 상쇄능(약 10%)보다 크게 높고, 도시지역은 물론 전형적인 농촌지역인 서천군(약 12%)보다 높은 것이어서 주목된다.

적 요

본 연구는 국립생태원 캠퍼스의 탄소수지를 정량화하기 위하여 수행하였다. 현장조사는 국립생태원 캠퍼스의 기존 식생 중 침엽수림과 활엽수림에서 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 곰솔군락과 밤나무군락을 대상으로 수행하였다. 순생산량(NPP)은 상대생장법을 적용하여 측정하였고, 토양호흡량은 EGM-4를 적용하여 측정하였다. 곰솔군락과 밤나무군락의 순생산량은 각각 $4.9 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 과 $5.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 나타났고, 종속영양생물 호흡량은 각각 $2.4 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 과 $3.5 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 나타났다. 순생산량과 종속영양생물 호흡량을 차감 계산하여 얻은 순생태계생산량(NEP)은 곰솔군락과 밤나무군락에서 각각 $2.5 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 과 $1.8 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다. 본 연구로부터 얻은 곰솔군락과 밤나무군락의 생태계순생산량 지수를 기존 식생에 적용하고 다른 연구로부터 얻은 여러 식생유형의 생태계순생산량 지수를 도입 식생에 대입하여 평가된 국립생태원에 성립된 전 식생의 탄소흡수능은 $147.6 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났고, 이를 이산화탄소로 환산하면 $541.2 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 이러한 탄소흡수능은 에코리움으로 알려진 유리온실을 비롯하여 국립생태원 내 여러 시설을 운용하며 배출하는 탄소량의 62%에 해당한다. 이러한 탄소상쇄능은 대한민국 국토 전체 및 전형적인 농촌지역인 서천군의 탄소상쇄능의 약 5배에 해당한다. 현재 진행 중인 기후변화가 지구적 차원의 탄소수지 불균형에 기원했음을 고려하면, 본 연구에서 시도한 토지이용유형을 반영한 공간차원의 탄소수지 평가는 기후변화 문제를 근본적으로 해결하기 위해 요구되는 기초정보를

제공할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2013년도 서울여자대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- Amichev, B.Y., J.A. Burger and J.A. Rodrigue. 2008. Carbon sequestration by forests and soils on mined land in the Midwestern and Appalachian coalfields of the U.S. *Forest Ecology and Management* **256**: 1949-1959
- Amthor, J.S. 1995. Terrestrial higher plant response to increasing atmospheric CO_2 in relation to global carbon cycle. *Global Change Biology* **1**: 243-274.
- Barbour, M.G., J.H. Burk, W.D. Pitts, F.S. Gilliam and M.W. Schwartz. 1999. *Terrestrial plant ecology*. Benjamin/Cummings, an Imprint of Addison Wesley Longman, Inc., Menlo Park, CA.
- Bekku, Y., H. Koizumi, T. Oikawa and J. Iwaki. 1997. Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology* **5**: 247-254.
- 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**: 184-187.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* **263**: 185-190.
- Fang, C., P. Smith, J.B. Moncrieff and J.U. Smith. 2005. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature* **433**: 57-59.
- Han, D.Y. 2002. Carbon cycle modeling by litter decomposition rate and estimation of carbon dioxide budget in *Quercus mongolica* forest at Mt. Songni National Park. Ph D. Thesis, Chungbuk National University, Cheongju. (in Korean with English abstract)
- Houghton, R.A. 1995. Land-use changes and the carbon cycle. *Global Change Biology* **1**: 275-287.
- IPCC. 2001. *Climate change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Joo, S.J., M.S. Park, G.S. Kim and C.S. Lee. 2011. CO_2 flux in a cool-temperate deciduous forest (*Quercus mongolica*) of Mt. Nam in Seoul, Korea. *Journal of Ecology and Field Biology* **34**: 95-106.
- Kim, S.K. and J.Y. Jeong. 1985. A study on the production struc-

- ture and biomass productivity of *Quercus variabilis* natural forest. *Journal of Korean Forestry Society* **70**: 91-102. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Research Institute. 2010. Study on the basis of forest carbon accounting in Korea. Korea Forest Research Institute, Seoul. (in Korean)
- Kucera, C.L. and D.R. Kirkham. 1971. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology* **52**: 912-915.
- Lee, C.S., G.S. Kim, J.H. Pi and S.M. Kim. 2011. Ecological diagnosis and restoration plan of the National Ecological Institute (Ecoplex) construction area. *Journal of Restoration Ecology* **2**: 77-87.
- Lee, K.J., H.Y. Won and H.T. Mun. 2012. Contribution of root respiration to soil respiration for *Quercus acutissima* forest. *Korean Journal of Environment and Ecology* **26**: 780-786. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.S. 2003. Method for assessing forest carbon sink by ecological process-based approach-a case study for Tadayama Station, Japan. *Korean Journal of Ecology* **23**: 131-134.
- Lim, Y.K. 2014. Monitoring on the establishing process of the restored ecosystems in the National Institute of Ecology. Master Thesis, Seoul Women's University, Seoul. (in Korean with English abstract)
- Litton, C.M., M.G. Ryan and D.H. Knight. 2004. Effects of tree density and stand age on carbon allocation patterns in postfire lodgepole pine. *Journal of Applied Ecology* **14**: 460-475.
- MOE (Ministry of Environment). 2010. Korean long-term ecological research 2th report. MOE, Gwacheon. (in Korean)
- MOE (Ministry of Environment). 2011. Sectional impact on atmospheric carbon budget over Korea: environmental policy support. MOE, Gwacheon. (in Korean)
- NIE (Planning Office for Construction of National Institute of Ecology). 2012. Development of a program to estimate CO₂ budget in the whole operation process of the National Institute of Ecology (in Korean). NIE, Gwacheon. (in Korean)
- Palmer, M.A., S. Filoso and R.M. Fanelli. 2014. From ecosystem to ecosystem services: Stream restoration as ecological engineering. *Ecological Engineering* **65**: 62-70.
- Park, I.H. and S.M. Lee. 1990. Biomass and net production of *Pinus densiflora* natural forests of four local forms in Korea. *Journal of Korean Forestry Society* **79**: 196-204. (in Korean with English abstract)
- Park, M.S., S.J. Joo and C.S. Lee. 2013. Effects of urban park and residential area on the atmospheric CO₂ concentration and flux in Seoul of Korea. *Advances in Atmospheric Sciences* **30**: 503-514.
- Prentice, I.C., G.D. Farquhar, M.J.R. Fasham, M.L. Goulden, M. Heimann, V.J. Jaramillo, H.S. Khashgi, C. Le Quere, R.J. Scholes and D.W.R. Wallace. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Moger, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson eds.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Pregitzer, K.S., A.J. Burton, D.R. Zak and A.F. Talhelm. 2008. Simulated chronic nitrogen deposition increases carbon storage in Northern temperate forests. *Global Change Biology* **14**: 142-153.
- Raich, J.W. and A. Tufekcioglu. 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry* **48**: 71-90.
- Tyrrell, M.L., J. Ross and M. Kelty. 2012. Carbon dynamics in the temperate forest. In: Managing Forest Carbon in a Changing Climate (Ashton, M.S., M.L. Tyrrell, D. Spalding, B. Gentry eds.). Springer, New York.
- UNEP. 2009. Climate change science compendium. UNEP.
- Yu, Y.J. 2011. Characteristic of soil respiration on major forest communities in Mt. Jumbong, Mt. Nam, Mt. Jiri. MA Thesis, Konkuk University, Seoul. (in Korean with English abstract)