

서울의 두 도시 근린공원에서 평가된 탄소수지

김경순[@] · 피정훈[#] · 안지홍 · 임치홍 · 정성희 · 주승진¹ · 이창석^{2,*}

서울여자대학교 대학원 생명환경공학과, ¹대기환경모델링센터, ²서울여자대학교 생명환경공학과

Carbon Budget Evaluated in Two Urban Parks of Seoul. Kim, Gyung Soon[@] (0000-0003-2921-665X), Jung Hun Pi[#] (0000-0002-2383-3991), Ji Hong An (0000-0001-8117-8780), Chi Hong Lim (0000-0001-8117-8780), Song Hie Jung (0000-0003-1726-9607), Seung Jin Joo¹ (0000-0003-4760-156X) and Chang Seok Lee^{2,*} (0000-0002-4288-4348) (Department of Biology, Graduate School of Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea; ¹Center for Atmospheric and Environmental Modeling, Seoul 08383, Korea; ²Department of Bio and Environment Technology, Seoul Women's University, Seoul 01797, Korea)

Abstract This study was carried out to assess the carbon budget of two urban parks and one natural park and to prepare the plan for improving the ecological functions of the park including carbon sink. Net Ecosystem Production (NEP) of those study sites was calculated from the relationship between Net Primary Production (NPP) and soil respiration of each study site. To understand carbon budget of the whole area designated as the park, carbon budget of the urban park was analyzed by classifying the vegetated and the non-vegetated zones. NEP of the Nohae and the Sanggye parks calculated by reflecting areal size that the non-vegetated zones occupy were shown in -1.0 and $0.6 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, respectively. On the other hand, NEP of Mt. Bulam natural park as a reference site was in $2.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Based on the result, the Nohae park was assessed as carbon source rather than carbon sink. On the other hand, the Sanggye park was classified as carbon sink but the role was poor compared with natural park. The result is, first of all, due to lower NPP of the vegetation introduced for the parks compared with natural vegetation. The other reason is due to wide arrangement of non-vegetated zone. To solve those problems and thereby to create the urban park with high ecological quality, selection of plant species suitable for the ecological characteristic of the park, their arrangement imitated natural vegetation, and ecological zoning were recommended.

Key words: carbon budget, heterotrophic respiration, Net Ecosystem Production (NEP), urban ecosystem, urban park

서 론

과도한 토지이용과 화석에너지 사용으로 인해 대기 중

CO₂ 농도가 증가하고 그에 따른 기후변화의 빠른 진행으로 탄소순환에 대한 관심이 늘어나고 있다. UN 기후변화 협약은 각국의 CO₂ 발생원 및 고정원에 대한 기여도 및 대기권 CO₂ 축적에 관여하는 과정에 대한 평가를 요구하고, IPCC는 지구적 차원에서 인위적 탄소배출을 제한하려고 노력하고 있다. 우리나라에서도 2012년 탄소배출권거래제 시행령을 입법 예고하였고, 2015년부터 탄소배출권거래제를 시행하고 있다(Kim *et al.*, 2014a). 이러한 기후변화 완

Manuscript received 1 September 2015, revised 17 February 2016, revision accepted 19 February 2016
*Corresponding author: Tel: +82-2-970-5822, Fax: +82-2-970-5974,
E-mail: leecs@swu.ac.kr
[@]Current address: National Institute of Ecology,
[#]Korea National Arboretum

화 노력의 핵심이 도시로부터 배출되는 탄소의 저감임은 주지의 사실이다(Grubler, 1994; O'Meara, 1999; IPCC, 2000). 전 세계적으로 약 2% 정도의 면적이 도시로 이루어져 있으나 전 세계 인구의 약 54%에 해당하는 39억 명 정도가 도시 지역에 거주하고 있다(UN DESA, 2014). 인구 집중, 주거지를 비롯한 도시화 지역의 확대, 도로의 확장 등에 따른 도시적 경관 요소의 증가가 도시 생태계의 탄소 수지에 큰 영향을 주기 때문에 도시의 경관 요소별 탄소흡수능 및 탄소수지 모니터링은 매우 중요하다(IPCC, 2006). IPCC에서는 이미 도시지역의 CO₂ 흡수량을 산정하여 보고하도록 요구하고 있으며, 5차 보고서(IPCC, 2014)에서는 주거지로 분류된 토지에서 도시 내 탄소 발생량을 측정하여 제시하는 한편, 탄소축적량 변화, 생물량, 고사유기물 그리고 토양탄소 변화와 관련된 온실가스 배출 및 흡수를 평가하는 방법을 다루고 있다.

원래 균형을 유지하던 지구적 차원의 탄소수지가 과도한 화석연료 사용과 토지이용 변화로 균형을 상실하며 기후변화를 주도하고 있다(Houghton, 1995; UNEP, 2009). 기후변화를 주도하는 CO₂ 농도는 지구적 차원은 물론 국지적 차원에서도 지속적으로 증가하는 추세에 있지만 그것의 연 변화는 뚜렷한 계절현상을 보여 겨울에 높고 여름에 낮다(Amthor, 1995; Park *et al.*, 2013). 이것은 온대지역의 숲이 CO₂의 고정원(sink)으로 작용한 결과이다(Barbour *et al.*, 1999). Eddy 공분산법을 적용하여 토지이용 유형이 다른 두 지소의 탄소 흐름을 분석한 결과(Park *et al.*, 2013)는 도시의 주거지역과 자연공원지역이 탄소수지에서 각각 발생원(source)과 고정원으로 기능하고 있음을 분명하게 보여주고 있다.

사실 지구적 차원의 탄소순환에서 인간 활동에 따른 토지이용 변화는 대기 중 CO₂ 농도를 높이는 주요인으로 등장하고 있다(Schimel, 1995). 한국에서 지역별 기온상승 추세는 지역의 토지이용 강도에 비례하는 경향이였다(Lee, 2015). 즉, 기온은 토지이용 강도가 높은 수도권과 영남지역에서 빠르게 증가하는 경향이였고, 백두대간을 중심으로 토지이용 강도가 낮은 지역에서는 기온상승이 거의 이루어지지 않았다. 탄소수지 또한 국내외에서 같은 경향을 보였다(Idso *et al.*, 1998; Lee, 2015).

이런 점에서 이제 우리는 기후변화 문제를 해결하는 접근법을 바꾸어야 할 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2014a). 기후변화를 비롯하여 모든 환경문제에는 발생원과 고정원이 있다. 우리는 환경문제 해결을 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).

생태적 해결책으로서 고정원의 기능을 개선하는 것은 생태계의 탄소 흐름에 대한 추적을 통해 가능하다. 생태계에서 탄소순환은 식물이 대기 중 이산화탄소를 광합성을 통해 고정하는 것으로부터 시작된다. 식물체에 고정된 탄소는 고사목, 낙엽, 낙지 등에서 분해되어 토양으로 공급된다. 이때 토양에 축적되지 않은 탄소의 일부는 대기로 방출된다. 이처럼 탄소가 여러 단계에 걸쳐 순환하므로 생태계 탄소수지를 정량적으로 파악하기 위해서는 식생, 토양, 대기로 이어지는 여러 단계의 탄소 흐름을 복합적으로 고려하여야 한다. 대기로부터의 탄소 흡수와 토양으로부터의 방출 결과를 함께 고려하여 정량한 탄소의 순획득 또는 순손실을 순생태계생산량(Net Ecosystem Production, NEP)이라 한다(Joo *et al.*, 2011). 이는 순생산량 중 독립영양생물 호흡과 종속영양생물 호흡으로 사용하고 남은 부분으로 이 부분이 순수하게 생물권에 저장되는 탄소의 양이 된다(Curtis *et al.*, 2002).

우리나라에서 수행된 탄소순환 및 탄소수지에 대한 연구는 대부분 일부 지역의 산림생태계 및 경작지에서 순생산량 및 토양호흡에 관한 단기측정 연구가 그 중심을 이루고 있으며, 순생태계생산량에 관한 연구는 드물게 수행되었다(Kim *et al.*, 2014a; Kim *et al.*, 2014b). 특히, 토지이용에 따른 육상생태계의 탄소수지 규명에 있어서 핵심적인 생태계 유형인 도시생태계에 대한 순생태계생산량에 관한 연구사례는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 생태계 탄소순환체계를 기준으로 토양이 방출하는 이산화탄소량과 그곳에 성립된 식물군락별 순생산량을 측정하여 도시 생태계의 주요 경관요소인 도시공원의 순생태계생산량을 정량하기 위해 시도하였다. 나아가 도시 근교에 성립한 자연림을 대조지소로 삼아 이들 도시공원이 탄소 수지에 기여하는 정도를 비교·평가하고, 그 개선방안을 제시하는 것은 본 연구의 또 하나의 목표가 된다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

도시공원은 도시지역에서 자연경관을 보호하고 시민의 건강, 휴양 및 생활의 질을 향상시키기 위해 설치 또는 지정된 도시생태계의 대표적 경관요소이다(MOLIT, 2013). 그러나 현재 국내에서 조성되는 도시공원은 지역 환경과 어울리지 않는 외래종이 도입되는 경우도 많고, 생태적 공간분포를 크게 벗어난 외지 종(일명, 국내 외래종)이나 더

큰 생태적 기능을 발휘할 수 있는 적합한 미소 서식처를 벗어나 도입 생물들이 배치되는 경우가 많다(Lee *et al.*, 2011; An *et al.*, 2014). 본 연구에서는 이러한 도시공원의 전형적인 모습을 보이고 있는 서울시 노원구 중계동에 위치한 노해근린공원과 상계동에 위치한 상계근린공원을 조사 대상으로 삼았다(Fig. 1).

한편, 본 연구에서는 연구지역에 인접한 자연지역인 불암산에 성립한 신갈나무(*Quercus mongolica*)군락을 대조지소로 선정하였다. 불암산은 1977년 7월 9일 건설부고시 제138호에 의해 도시자연공원으로 지정되었다(Lee *et al.*, 2006). 불암산은 서울시 노원구와 남양주시의 경계에 위치하여 남북으로 길게 형성된 산악지형으로, 정상부를 중심으로 발달한 대보화강암의 영향으로 토심이 얇고, 경사가 급하여 토양 내 수분 함량이 낮은 특성을 나타낸다. 주요 식생은 신갈나무군락을 비롯하여 소나무군락, 상수리나무군락, 굴참나무군락 등으로 이루어진다(Na, 1997). 본 연구에서는 이 지역의 잠재 자연 식생으로 평가되는 신갈나무군락을 대상으로 연구를 수행하였다.

2. 종 조성

조사지소에 성립한 식생의 구조를 파악하기 위해 도시공원의 경우 40 m×40 m 크기의 방형구를 설치하였고, 자연 식생인 불암산 신갈나무군락의 경우 20 m×20 m 크기의 방형구를 설치하였다. 식생조사는 방형구 안에 출현한 흉고직경 2.5 cm 이상의 목본식물을 대상으로 수행하였다.

3. 순생산량

식생의 순생산량(NPP, Net Primary Productivity)을 측정하기 위한 상대성장식은 기존의 것을 이용하였고(Whittaker and Marks, 1975; Jo, 1999; Kwak *et al.*, 2004; KFRI, 2010; Institution of Mt. Halla, 2012; Jo and Ahn, 2012; KFRI, 2014), 상대성장식이 정해지지 않은 식물 종의 경우는 유사한 성장형을 가진 식물의 상대성장식을 이용하였다. 지하부 현존량의 상대성장식이 정립되지 않은 종의 지하부 현존량은 Whittaker and Marks (1975)의 실험치인 0.25를 곱하여 추정하였다. 본 연구에 사용된 상대성장식은 Table 1과 같다.

순생산량을 산출하기 위해 각 연구지소에 설치된 방형구 안에 출현하는 흉고직경 2.5 cm 이상인 목본식물의 흉고직경 및 수고를 측정하였다. 2011년 10월과 2012년 9월에 각각 흉고직경과 수고를 측정하고 이를 상대성장식에 대입하여 2011년의 현존량(W1)과 2012년의 현존량(W2)을 산정하였다. 양 현존량으로부터 증가량($\Delta W = W2 - W1$)을

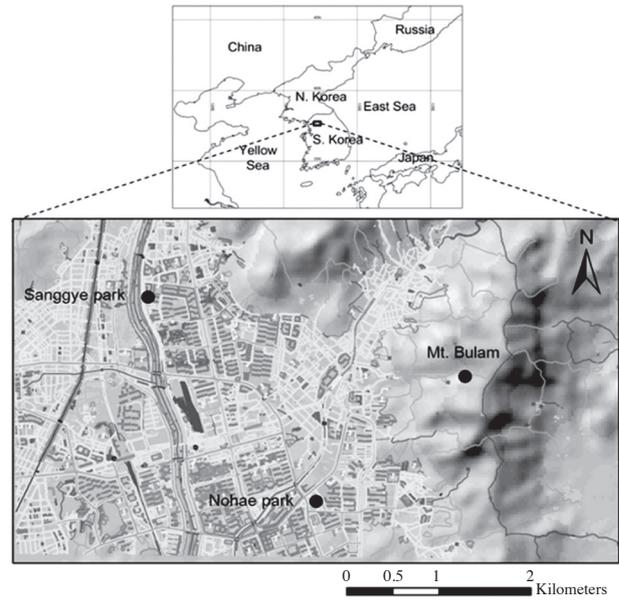


Fig. 1. A map showing the geographical location of the study sites, Sanggye park, Nohae park and Mt. Bulam.

산출하여 순생산량으로 삼았다.

불암산 신갈나무군락의 경우 도시공원과 같은 방법을 적용하여 순생산량을 산정하였다.

탄소의 양은 IPCC(2001)의 탄소전환계수를 이용하여 추정하였고, 이를 이산화탄소량으로 환산하였다(Han, 2002). 흉고직경은 직경 테이프(Diameter tape; KOBIC, Korea)를 이용하여 측정하였다.

4. 토양호흡량

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

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

토양호흡은 12개월 동안(도시공원: 2011. 10~2012. 9, 불암산 신갈나무군락: 2013. 5~2014. 4) 매월 1회 정기적

Table 1. Allometric equations used to calculate total biomass of plant species appeared within quadrats installed in Sanggye park, Nohae park, and Mt. Bulam.

Species	Equation (total biomass)	Reference
<i>Quercus mongolica</i> <i>Alnus hirsuta</i> <i>Symplocos chinensis</i> <i>Rhus trichocarpa</i>	$Y(g) = 834.069D^{1.91565}$	Korea Forest Research Institute, 2010
<i>Pinus densiflora</i> <i>Juniperus rigida</i>	$Y(g) = 92.577D^{2.44243}$	
<i>Quercus serrata</i> <i>Pinus koraiensis</i> <i>Liriodendron tulipifera</i>	$Y(kg) = 0.177 * D^{2.195} + 0.003 * D^{3.265} + 0.002 * D^{2.713} + 0.400 * D^{1.676}$ $Y(kg) = 0.064D^{2.377} + 0.621D^{1.395} + 0.025D^{2.237} + 0.056D^{2.175}$ $Y(kg) = 0.121D^{2.288} + 0.020D^{2.228} + 0.090D^{1.263} + 0.0001D^{3.913}$	Korea Forest Research Institute, 2014
<i>Sorbus alnifolia</i>	$Y(g) = 90.698D^{2.469} + 5.550D^{3.089} + 3.189D^{2.492} + 32.307D^{2.449}$	Institution of Mt. Halla, 2012
<i>Acer palmatum</i>	$Y(kg) = -46.4127 + 9.7076D$	
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i> <i>Prunus sargentii</i> <i>Ginkgo biloba</i> <i>Zelkova serrata</i>	$\ln Y(kg) = -2.1333 + 2.4181 * \ln D$ $\ln Y(kg) = -2.1497 + 2.3787 * \ln D$ $\ln Y(kg) = -1.7777 + 2.3862 * \ln D$	Jo and Ahn, 2012
<i>Zizyphus jujube</i> var. <i>inermis</i>	$\log Y(kg) = \{0.667\log(D^2H) - 0.419\} + \{0.553\log(D^2H) - 0.6419\} + \{0.3257\log(D^2H) - 0.5419\} * 1.25$	
<i>Aesculus turbinata</i>	$\log Y(kg) = \{0.668\log(D^2H) - 0.5908\} + \{0.5276\log(D^2H) - 2.9032\} + \{0.6819\log(D^2H) - 1.0911\} * 1.25$	
<i>Malus floribunda</i>	$\log Y(kg) = \{0.8077\log(D^2H) - 0.7313\} + \{0.843\log(D^2H) - 1.3403\} + \{0.578\log(D^2H) - 1.0167\} * 1.25$	
<i>Ulmus parvifolia</i>	$\log Y(kg) = \{0.8245\log(D^2H) - 1.1764\} + \{0.5723\log(D^2H) - 1.2772\} + \{0.4468\log(D^2H) - 1.364\} * 1.25$	
<i>Pyrus pyrifolia</i> <i>Magnolia kobus</i> <i>Fraxinus rhynchophylla</i> <i>Magnolia denudata</i> <i>Cornus officinalis</i> <i>Prunus armeniaca</i> var. <i>ansu</i>	$\log Y(kg) = \{0.9237\log(D^2H) - 1.0433\} + \{1.4489\log(D^2H) - 2.64\} + \{0.9065\log(D^2H) - 1.7552\} * 1.25$	
<i>Diospyros kaki</i> <i>Diospyros lotus</i>	$\log Y(kg) = \{0.942\log(D^2H) - 0.0029\} + \{0.3167\log(D^2H) - 0.0047\} + \{0.6028\log(D^2H) - 0.7241\} * 1.25$	Kwak <i>et al.</i> , 2004
<i>Platanus occidentalis</i>	$\log Y(kg) = \{0.9891\log(D^2H) - 1.3363\} + \{1.1686\log(D^2H) - 2.6304\} + \{0.9221\log(D^2H) - 2.2675\} * 1.25$	
<i>Acer buergerianum</i> <i>Acer pseudo-sieboldianum</i>	$\log Y(kg) = \{2.288\log D + 2.1265\} + \{2.8149\log D + 0.9032\} + \{1.931\log D + 0.9146\} * 1.25$	
<i>Koelreuteria paniculata</i> <i>Prunus mume</i> <i>Chaenomeles sinensis</i>	$\log Y(kg) = \{2.4505\log D + 1.9423\} + \{2.4936\log D + 1.1606\} + \{2.4936\log D + 1.1606\} * 1.25$	
<i>Sophora japonica</i>	$\log Y(kg) = \{2.4692\log D + 1.9576\} + \{3.0887\log D + 0.7443\} + \{2.492\log D + 0.5036\} * 1.25$	
<i>Juniperus chinensis</i>	$\log Y(kg) = \{2.639\log D - 1.8017\} + \{2.334\log D - 1.871\} + \{1.561\log D - 0.8543\} * 1.25$	
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	$\log Y(kg) = \{2.74\log D + 1.45\} + \{2.970\log D + 0.44\} + \{2.86\log D + 0.43\} * 1.25$	

Table 1. Continued.

Species	Equation (total biomass)	Reference
<i>Rhododendron mucronulatum</i> <i>Zanthoxylum schinifolium</i>	$\ln DW(g) = (3.8212 + 2.3652 \ln DAG) * 1.25$	Jo, 1999

Remarks. Carbon factor: 0.5 (IPCC, 2001), Below-ground biomass estimation coefficient: 0.25 (Whittaker and Marks, 1975), D: DBH, H: Height, DAG: Root Collar Caliper, Y:DW: Dry weight

Table 2. Density, diameter at breast height, basal area, and net primary production of woody plants established in Nohae park.

Species	Density (N ha ⁻¹)	2011		2012		NPP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
		Mean DBH (cm)	Basal area (cm ²)	Mean DBH (cm)	Basal area (cm ²)	
<i>Diospyros kaki</i>	6	14.3	160.5	14.5	165.0	0.086
<i>Diospyros lotus</i>	6	9.5	70.8	9.6	72.3	0.030
<i>Zelkova serrata</i>	219	16.6	8,177.9	17.2	8,754.6	1.406
<i>Acer palmatum</i>	181	11.8	3,509.6	12.2	3,740.8	0.355
<i>Pyrus pyrifolia</i>	6	12.0	113.0	12.3	118.8	0.049
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	19	13.7	529.6	14.2	563.3	0.064
<i>Koelreuteria paniculata</i>	6	11.4	102.0	12.0	113.0	0.024
<i>Chaenomeles sinensis</i>	25	10.7	374.9	11.2	409.3	0.075
<i>Magnolia kobus</i>	6	8.5	56.7	8.5	56.7	0.010
<i>Magnolia denudata</i>	50	6.1	239.7	6.2	250.2	0.182
<i>Prunusserrulata</i> var. <i>spontanea</i>	56	12.8	1,270.0	13.6	1,429.2	0.275
<i>Cornus officinalis</i>	69	8.3	624.3	8.4	649.1	0.243
<i>Prunus armeniaca</i> var. <i>ansu</i>	100	11.5	1,847.3	11.7	1,906.1	0.660
<i>Platanus occidentalis</i>	69	27.9	7,609.0	28.3	7,776.7	1.191
<i>Ginkgo biloba</i>	38	8.0	302.8	8.5	341.5	0.279
<i>Pinus koraiensis</i>	81	12.0	1,545.6	12.3	1,620.7	0.131
<i>Ulmus parvifolia</i>	25	24.2	1,855.3	25.0	1,981.4	0.148
<i>Sorbus alnifolia</i>	19	7.5	135.2	7.8	145.4	0.019
<i>Sophora japonica</i>	31	15.8	1,076.8	16.2	1,133.2	0.192
Total	1,013	-	29,601.2	-	31,227.4	5.422

측정을 원칙으로 하고, 하루 중 10:00~13:00 사이에 6개 보조 방형구에서 4회 반복하여 측정하였다. 매일 측정된 토양호흡 값을 해당 월의 대표 값으로 사용하였다. 토양호흡은 식생지역과 나지에서 동일한 방법으로 측정되었다. 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 증가속도로 부터 토양호흡을 계산하는 방법은 식 1과 같다.

$$\text{Soil respiration (mg CO}_2\text{ mg}^{-2}\text{ h}^{-1}) = apVS^{-1} \quad (1)$$

- a: CO₂ 농도 변화율
- p: CO₂ 밀도(mg m⁻³)
- V: Chamber의 부피(m³)
- S: 토양 면적(m²)

순생태계생산량 산출을 위한 토양의 종속영양생물 호흡량은 온대활엽수림 내 산림 토양의 종속영양생물 호흡 비율로 알려진 55%를 적용하였고(Raich and Tufekcioglu, 2000), 뿌리호흡량은 전체 토양호흡량으로부터 종속영양생물 호흡량을 차감하여 계산하였다(Lee, 2003).

5. 순생태계생산량

순생태계생산량(NEP, Net Ecosystem Production)은 식물군락에 의한 CO₂ 흡수량(NPP, Net Primary Productivity)과 토양의 종속영양생물의 호흡에 의한 CO₂ 배출량 사이의 차이로 구하였다.

그러나 공원구역 내에는 식생이 성립되지 않은 나지가 넓은 면적을 차지하고 있어, 공원구역 전체의 탄소흡수 기여도를 평가하기 위해서는 식생이 성립된 공간과 성립되지 않은 공간을 구분하여 탄소흡수량을 계산할 필요가 있

Table 3. Density, diameter at breast height, basal area, and net primary production of woody plants established in Sanggye park.

Species	Density (N ha ⁻¹)	2011		2012		NPP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
		Mean DBH (cm)	Basal area (cm ²)	Mean DBH (cm)	Basal area (cm ²)	
<i>Malus floribunda</i>	69	7.1	463.4	7.3	486.3	0.109
<i>Zelkova serrata</i>	156	15.2	5,476.8	15.7	5,766.8	0.711
<i>Acer palmatum</i>	13	16.2	414.3	16.6	436.6	0.024
<i>Prunus mume</i>	13	4.2	28.5	4.4	31.0	0.003
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	56	16.5	2,293.5	17.1	2,440.8	0.373
<i>Magnolia denudata</i>	56	5.4	227.0	5.6	237.8	0.031
<i>Liriodendron tulipifera</i>	81	28.7	8,720.7	29.4	9,135.9	0.919
<i>Ginkgo biloba</i>	56	14.5	2,032.8	15.1	2,180.5	0.251
<i>Pinus koraiensis</i>	400	11.9	7,571.2	12.3	8,019.7	0.787
<i>Acer buergerianum</i>	150	25.0	13,343.6	25.8	13,918.1	1.550
<i>Aesculus turbinata</i>	19	10.6	321.7	10.9	339.9	0.017
<i>Juniperus chinensis</i>	13	5.4	45.4	5.5	47.3	0.001
<i>Sophora japonica</i>	6	30.0	706.5	30.1	711.2	0.022
Total	1,088	—	41,645.4	—	43,751.9	4.800

다. 따라서 식생이 성립되지 않은 나지는 토양호흡량을 배정하고, 식생이 성립한 공간은 순생산량과 토양의 종속영양생물 호흡량을 차감 계산한 값을 배정하여 공원구역 전체의 순생태계생산량을 산정하였다.

결 과

1. 종 조성

노해근린공원의 방형구에 출현한 식물의 밀도는 느티나무(*Zelkova serrata*) 219 본 ha⁻¹, 단풍나무(*Acer palmatum*) 181 본 ha⁻¹, 살구나무(*Prunus armeniaca* var. *ansu*) 56 본 ha⁻¹ 등으로 조사되었다. 기저면적은 느티나무(*Z. serrata*)가 8,754.6 cm²로 가장 넓었고, 양버즘나무(*Platanus occidentalis*) (7,776.7 cm²), 단풍나무(*A. palmatum*) (3,740.8 cm²) 등의 순서로 넓게 나타났다(Table 2).

상계근린공원의 방형구에 출현한 식물의 밀도는 잣나무(*Pinus koraiensis*) 400 본 ha⁻¹, 느티나무(*Z. serrata*) 156 본 ha⁻¹, 중국단풍(*Acer buergerianum*) 150 본 ha⁻¹ 등으로 나타났다. 기저면적은 중국단풍(*A. buergerianum*) (13,918.1 cm²)이 가장 넓었고, 백합나무(*Liriodendron tulipifera*) (9,135.9 cm²), 잣나무(*P. koraiensis*) (8,019.7 cm²) 등의 순서로 넓게 나타났다(Table 3).

불암산 신갈나무군락의 방형구에 출현한 식물은 신갈나무(*Quercus mongolica*) 500 본 ha⁻¹, 소나무(*Pinus densiflora*) 150 본 ha⁻¹, 팔배나무(*Sorbus alnifolia*) 600 본 ha⁻¹ 등으로 나타났다. 기저면적은 신갈나무(*Q. mongolica*)가

5,431.0 cm²로 가장 넓었고, 소나무(*P. densiflora*) (1,621.0 cm²), 진달래(*Rhododendron mucronulatum*) (720.0 cm²) 등의 순으로 나타났다(Table 4).

2. 순생산량

노해근린공원과 상계근린공원에 조성된 식생의 순생산량은 각각 5.4 ton C ha⁻¹ yr⁻¹와 4.8 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타났고(Tables 2, 3), 불암산 신갈나무군락의 순생산량은 6.4 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타났다(Table 4).

3. 토양호흡량

노해근린공원, 상계근린공원 및 불암산 신갈나무림의 연간 토양호흡량 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 토양호흡은 세 지역에서 모두 여름에 가장 높고 겨울에 가장 낮은 전형적인 계절변화 양상을 보였다. 노해근린공원과 상계근린공원의 경우 8월에 토양호흡량이 가장 많았고(노해근린공원: 1,431.2 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, 상계근린공원: 993.7 mg CO₂ m⁻² h⁻¹), 12월에 가장 적었다(노해근린공원: 99.3 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, 상계근린공원: 24.6 mg CO₂ m⁻² h⁻¹) (Fig. 2a). 불암산 신갈나무군락의 토양호흡량은 7월에 최대치를 보였고(858.4 mg CO₂ m⁻² h⁻¹), 1월에 최소치(28.9 mg CO₂ m⁻² h⁻¹)를 나타내었다. 한편, 도시공원 중 식생이 도입되지 않은 나지의 토양호흡량은 8월에 최고치를 보였고(183.18 mg CO₂ m⁻² h⁻¹), 1월에 최저치(62.09 mg CO₂ m⁻² h⁻¹)를 보였었다(Fig. 2b).

연간 토양호흡량은 노해근린공원과 상계근린공원에서

Table 4. Density, diameter at breast height, basal area, and net primary production of woody plants established in *Q. mongolica* stand of Mt. Bulam.

Species	Density (N ha ⁻¹)	2013		2014		NPP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
		Mean DBH (cm)	Basal area (cm ²)	Mean DBH (cm)	Basal area (cm ²)	
<i>Rhus trichocarpa</i>	25	2.6	5.3	2.7	5.7	0.005
<i>Juniperus rigida</i>	25	2.2	3.8	2.3	4.2	0.001
<i>Symplocos chinensis</i>	25	3.2	8.0	3.4	9.1	0.012
<i>Acer pseudo-sieboldianum</i>	25	2.9	6.6	3.2	8.0	0.006
<i>Alnus hirsuta</i>	75	13.4	457.2	13.7	473.8	0.167
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	150	9.5	544.7	9.8	559.5	0.693
<i>Zanthoxylum schinifolium</i>	25	2.1	3.5	2.6	5.3	0.002
<i>Pinus densiflora</i>	150	16.6	1,515.2	17.3	1,621.1	0.703
<i>Quercus mongolica</i>	500	15.5	5,122.0	16.2	5,431.0	3.109
<i>Quercus serrata</i>	25	20.1	317.1	20.6	333.1	0.183
<i>Rhododendron mucronulatum</i>	1,600	2.5	371.8	3.6	720.0	0.586
<i>Sorbus alnifolia</i>	600	4.3	400.2	5.1	546.4	0.947
Total	3,225	—	8,755.4	—	9,717.2	6.414

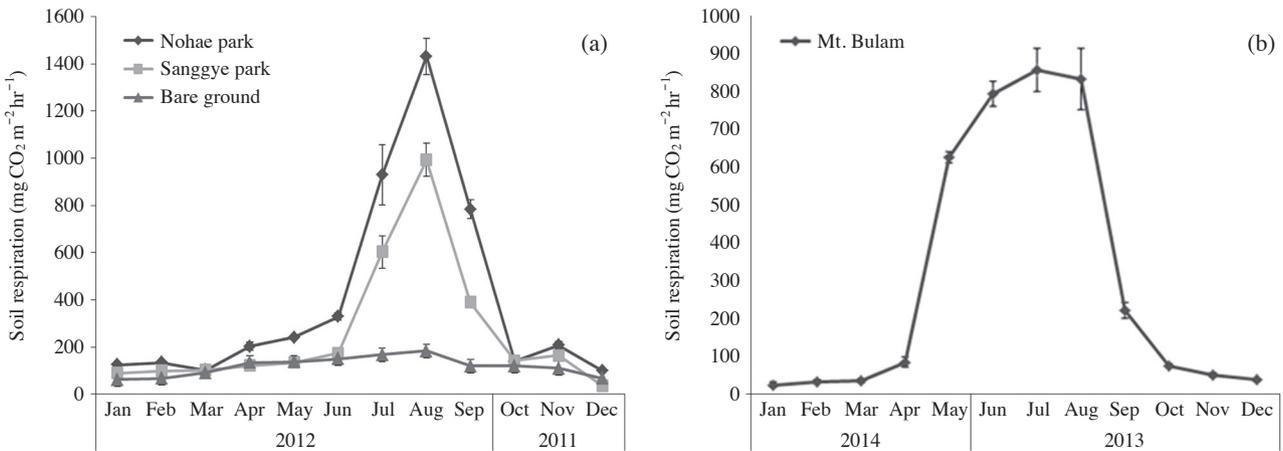


Fig. 2. Seasonal variation of monthly mean soil respiration rate of Nohae park, Sanggye park and monthly mean soil respiration rate of bare ground in two parks, b: Mt. Bulam, mean ± SE, n = 24).

Table 5. Net ecosystem production of vegetated land in Nohae park, Sanggye park and Mt. Bulam.

Site	NPP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Heterotrophic respiration (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	NEP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
Nohae park	5.4	5.2	0.2
Sanggye park	4.8	3.4	1.4
Mt. Bulam	6.4	4.1	2.3

각각 9.5 ton C ha⁻¹ yr⁻¹와 6.1 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 측정되었고, 불암산 신갈나무군락의 연간 토양호흡량은 7.5 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 측정되었다. 한편, 도시공원 중 식생이 도입되지 않은 나지의 연간 토양호흡량은 2.9 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 측정되었다.

4. 순생태계생산량

노해근린공원과 상계근린공원의 식생 성립지역 및 불암산 신갈나무군락의 순생태계생산량은 각각 0.2 ton C ha⁻¹ yr⁻¹, 1.4 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 및 2.3 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타났다 (Table 5). 그러나 나지가 포함된 공원구역 전체를 고려하

Table 6. The actual net ecosystem production of Nohae park and Sanggye park.

Site	Green space (ha)	Bare ground (ha)	The actual NEP of green space (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	The actual NEP of bare ground (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	The actual NEP (ton C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
Nohae park	2.43	1.43	0.1	-1.1	-1.0
Sanggye park	3.09	0.73	1.1	-0.5	0.6

여 계산된 노해근린공원과 상계근린공원의 순생태계생산량은 각각 $-1.0 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 와 $0.6 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다(Table 6).

고 찰

1. 도시공원과 자연림의 탄소흡수능

상계근린공원과 노해근린공원 식생지역의 순생태계생산량은 아파트단지 내 녹지($1.4 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)와 유사한 값을 나타내었다(MOE, 2011). 그러나 나지를 포함하여 계산할 경우 도시공원은 탄소배출원 이거나(노해근린공원) 탄소흡수원이 되어도 그 기능이 미약한 것으로 평가되었다(상계근린공원)(Table 6).

이러한 결과는 우선 식생 도입공간이 차지하는 비중이 낮고 이에 더하여 도시공원의 순생산량이 자연림과 비교해 낮은 것에 기인한다. 순생산량이 낮은 것은 적합하지 않은 식물 종 선발, 생태적 측면이 고려되지 않은 식생의 수평 및 수직적 공간배치 등에 기인한다(MOE, 2011).

한편, 불암산 신갈나무군락의 순생태계생산량($2.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)은 탄소흡수원으로 기능하고 있음을 반영하고, 그 값은 청주지역 신갈나무군락(NEP: $2.2 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 및 남산지역의 신갈나무군락(NEP: $2.9 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)과 유사한 값을 나타내었다(MOE, 2011).

2. 도시공원의 탄소흡수능 증진 전략

노해근린공원과 상계근린공원의 임분 밀도는 각각 $1,013 \text{ 본 ha}^{-1}$ 및 $1,088 \text{ 본 ha}^{-1}$ 로서 불암산 신갈나무림의 임분 밀도($3,225 \text{ 본 ha}^{-1}$)보다 크게 낮았다(Tables 2~4). 대조지소인 불암산에서 이처럼 높은 임분 밀도는 팔배나무, 진달래 등 아교목층 및 관목층 발달에 기인한다. 층위별 임분 발달에 따른 개체수 증가는 뿌리의 양을 증가시켜 토양호흡에 영향을 주기도 하지만(Kucera and Kirkham, 1971; Litton *et al.*, 2004), 아교목층 및 관목층의 높은 밀도와 생장률이 순생산량의 증가에도 영향을 미친다. 불암산 신갈나무군락에서 수종별 순생산량은 교목층의 신갈나무에서 3.1 ton

$\text{C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 가장 높았고, 아교목층의 팔배나무, 소나무, 물푸레나무, 관목층의 진달래에서 각각 $0.95 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, $0.70 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, $0.69 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 및 $0.59 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 순으로 나타났다. 한편, 상계근린공원에서는 중국단풍이 $1.55 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 가장 높았고, 백합나무 $0.92 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 잣나무 $0.79 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 느티나무 $0.71 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 순으로 나타났다. 노해근린공원에서는 느티나무가 $1.41 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 가장 높았고, 양버즘나무 $1.19 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 살구나무 $0.66 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 단풍나무 $0.36 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 순으로 나타났다. Henry *et al.* (2010)은 유형별 비오톱을 대상으로 식물의 다양성에 따른 탄소흡수능에 대한 연구에서 다층 식생이 탄소 저감에 유리하게 작용함을 밝히고 있다. 탄소 저감 외에도 다층 식재는 대기오염 완화, 물 순환, 생물다양성 유지 등 생태적 기능의 개선에도 기여하므로(Miller, 1997), 도시공원 조성에서 반드시 고려하여야 할 사항이 된다(Lee and Lee, 2004).

한편, 도시공원에 도입된 양버즘나무, 백합나무 등은 생산성이 높게 나타났지만, 이와 같은 속성수는 수명이 짧아 빨리 성숙단계에 이르고, 그 경우 더 이상 탄소를 흡수하지 못하므로 그 효과가 일시적이고 한계가 있다(Park, 2009).

또한, 도시지역에서 숲이 발휘하는 생태계 서비스 기능을 극대화하기 위해서는 이와 같은 외래종의 도입은 지양해야 한다(SERI, 2004; Tallamy, 2004). 더구나 본 연구를 수행한 노해근린공원과 상계근린공원은 불암산, 수락산, 도봉산 등 서울의 대표적 자연지역과 인접해 있으므로, 이들 지역으로 종자 산포자 및 인간에 의한 외래종의 침입이 우려된다. 도입 초기에 이들 외래종은 일시적으로 종 다양성을 높이지만, 군집의 종 조성(Lopezaraiza-Mikel *et al.*, 2007; Aizen *et al.*, 2008), 영양 염류 순환(Ehrenfeld, 2003) 및 교란체계(Brooks *et al.*, 2004)를 변화시키고, 자연 식생이 성립할 수 있는 장소를 훼손하여 결과적으로 종 다양성을 낮추게 된다(Vitousek *et al.*, 1997). 또한 도입된 외래 식물은 곤충 및 조류로 이어지는 먹이그물을 변화시켜 그들의 풍부도와 생물량에도 영향을 미친다(Tallamy, 2004; Jenkins and Mooney, 2006; Heleno *et al.*, 2009). 뿐만 아니라 Lamb *et al.* (2005)은 자연 식생으로 이루어지는 산림 복원이 산불이나 질병에 더 높은 저항력을 가지기 때문에

탄소시장에서 자연 복원은 인공 조립보다 더 높은 인센티브가 부여되어야 한다고 제안한 바 있다.

도시생태계의 복원은 Bradshaw (1983)가 제시한 창조형 복원에 속하며, 이는 원하는 식물군락의 정보를 대조생태계를 통하여 획득하고, 그 정보를 활용하여 새로운 생태계를 창조하는 방법을 의미한다. 따라서 성공적으로 도시생태계를 복원하기 위해서는 비슷한 환경에 성립한 온전한 자연림을 대조생태계로 삼아 그 구조를 모방할 필요가 있다(National Research Council, 1991; Aronson *et al.*, 1993; Berger, 1993; Lee *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2011). 이러한 대조 생태계는 복원을 위한 기초정보를 제공하며 복원사업 후에는 그 성공 여부를 평가하는 지침이 된다(SERI, 2004; Lee *et al.*, 2011).

본 연구의 결과에서 보듯이 외래종을 도입하여 조성된 도시공원은 지형적으로 평지 내지 저지대 구릉지에 위치하여 산지 사면에 성립한 인근의 자연 식생과 비교하여 생태적으로 유리한 위치에 있음에도 불구하고 크게 낮은 탄소흡수능을 보였다(Table 5).

이러한 문제를 해결하여 생태적 기능이 높은 도시공원을 조성하기 위해서는 지소의 생태적 조건을 반영한 종의 선발, 자연 식생을 모방한 배치, 생태적 역할 중심의 공원 배치가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 서울시 노원구에 위치한 두 도시공원(노해근린공원, 상계근린공원)의 탄소수지를 정량하고 인접한 자연공원인 불암산 신갈나무림을 대상으로 동일한 조사를 수행하여 그 개선방안을 찾기 위해 수행하였다. 순생산량(NPP)은 상대성장법을 적용하여 측정하였고, 토양호흡량은 EGM-4를 이용하여 측정하였다. 노해근린공원과 상계근린공원에 조성된 식생의 순생산량은 각각 $5.4 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 와 $4.8 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났고, 불암산 신갈나무군락의 순생산량은 $6.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다. 연간 종속영양생물 토양호흡량은 노해근린공원과 상계근린공원에서 각각 $5.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 와 $3.4 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 측정되었고, 불암산 신갈나무군락의 토양호흡량은 $4.1 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 측정되었다. 공원구역에서 나지가 차지하는 면적을 반영하여 산정한 노해근린공원과 상계근린공원의 순생태계생산량은 각각 $-1.0 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 와 $0.6 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났고, 불암산 신갈나무군락의 순생태계생산량은 $2.3 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다. 순생태계생산량 정보에 근거하면 노해근린공원은 탄소배출원으로 분류되었다. 반면에 상계근

린공원은 탄소흡수원으로 구분되었지만 그 역할은 자연 식생과 비교해 크게 낮은 것으로 평가되었다. 도시공원의 낮은 순생태계생산량은 자연림과 비교해 낮은 순생산량과 탄소배출 기능이 있는 나지를 넓게 배정한 것에 기인하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 환경부의 도시 생태계 적응 관리 기술 연구단 과제(과제번호 416-111-014)의 지원을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- Aizen, M.A., C.L. Morales and J.M. Morales. 2008. Invasive mutualists erode native pollination webs. *PLoS Biology* **6**: 396-403.
- 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 CO₂ in relation to global carbon cycle. *Global Change Biology* **1**: 243-274.
- An, J.H., C.H. Lim, Y.K. Lim, K.B. Nam and C.S. Lee. 2014. A review of restoration project evaluation and post management for ecological restoration of the river. *Journal of Restoration Ecology* **4**: 15-34.
- Aronson, J., C. Floret, E. Le Floch, C. Ovalle and R. Pontanier. 1993. Restoration and Rehabilitation of Degraded Ecosystems in Arid and Semi-Arid Lands. I. A View from the South. *Restoration Ecology* **1**: 8-17.
- Barbour, M.G., J.H. Burk, W.D. Pitts, F.S. Gilliam and M.W. Schwartz. 1999. Terrestrial plant ecology. Benjamin Cummings, San Francisco.
- Bekku, Y., H. Koizumi, T. Oikawa and J. Iwaki. 1997. Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology* **5**: 247-254.
- Berger, J.J. 1993. Ecological restoration and nonindigenous plant species: a review. *Restoration Ecology* **1**: 74-82.
- Bradshaw, A.D. 1983. The reconstruction of ecosystems: presidential address to the British Ecological Society, December 1982. *Journal of Applied Ecology* **20**: 1-17.
- Brooks, M.L., C.M. D'antonio, D.M. Richardson, J.B. Grace, J.E. Keeley, J.M. DiTomaso and D. Pyke. 2004. Effects of invasive alien plants on fire regimes. *BioScience* **54**: 677-688.
- Curtis, P.S., P.J. Hanson, P. Bolstad, C. Barford, J.C. Randolph, H.P. Schmid and K.B. Wilson. 2002. Biometric and eddy-

- covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**: 3-19.
- Ehrenfeld, J.G. 2003. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems* **6**: 503-523.
- Grubler, A. 1994. Technology and Global Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- 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., Dissertation. Chungbuk National University.
- Heleno, R.H., R.S. Ceia, J.A. Ramos and J. Memmott. 2009. Effects of Alien Plants on Insect Abundance and Biomass: a Food-Web Approach. *Conservation Biology* **23**: 410-419.
- Henry, L.A., A.J. Davies and J.M. Roberts. 2010. Beta diversity of cold-water coral reef communities off western Scotland. *Coral Reefs* **29**: 427-436.
- Houghton, R.A. 1995. Land-use changes and the carbon cycle. *Global Change Biology* **1**: 275-287.
- Idso, C.D., S.B. Idso and R.C. Balling Jr. 1998. The urban CO₂ dome of Phoenix, Arizona. *Physical Geography* **19**: 95-99.
- Institution of Mt. Halla. 2012. Survey of natural environment in Mt. Halla. Hallsan National Park, Jeju.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme (Eggleston, H.S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe, eds.). the Institute for Global Environmental Strategies, Hayama.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Jenkins, P.T. and H.A. Mooney. 2006. The United States, China, and invasive species: present status and future prospects. *Biological Invasions* **8**: 1589-1593.
- Jo, H.K. 1999. Carbon Uptake and Emissions in Urban Landscape, and the Role of Urban Greenspace for Several Cities in Kangwon Province. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* **27**: 39-53.
- Jo, H.K. and T.W. Ahn. 2012. Carbon Storage and Uptake by Deciduous Tree Species for Urban Landscape. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* **40**: 160-168.
- Joo, S.J., M.S. Park, G.S. Kim and C.S. Lee. 2011. CO₂ 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, G.S., Y.K. Lim, J.H. An, J.S. Lee and C.S. LEE. 2014a. Carbon Budget in Campus of the National Institute of Ecology. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 167-175.
- Kim, J.S., S.J. Kong and K.C. Yang. 2014b. A study on the soil CO₂ Efflux in *Quercus acutissima* stand at Mt. Bulam urban nature park. *Korean Journal of Environment and Ecology* **28**: 762-768.
- Korea Forest Research Institute. 2010. Study on the basis of forest carbon accounting in Korea. Korea Forest Research Institute, Seoul.
- Korea Forest Research Institute. 2014. Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Species in Korea. Korea Forest Research Institute, Seoul.
- Kucera, C.L. and D.R. Kirkham. 1971. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology* **52**: 912-915.
- Kwak, Y.S., Y.K. Hur, J.H. Song and J.K. Hwangbo. 2004. Quantification of Atmospheric Purification Capacity by Afforestation Impact Assessment of Kwangyang Steel Works. *Rist Research Paper* **18**: 334-340.
- Lamb, D., P.D. Erskine and J.A. Parrotta. 2005. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science* **310**: 1628-1632.
- Lee, C.S. 2015. Climate change adaptation achieving through ecological restoration. In: Lee, C.S. (ed.). National Long Term Ecological Research: climate change and ecology. National Institute of Ecology, Seocheon.
- Lee, C.S. and A.N. Lee. 2004. Restoration Effects Confirmed in the Environmental Forests Created on the Bases of Ecological Principles. *Korean Journal of Environmental Biology* **22**: 220-226.
- Lee, C.S., Y.M. Jeong and H.S. Kang. 2011. Concept, Direction, and Task of Ecological Restoration. *Journal of Restoration Ecology* **2**: 59-71.
- Lee, C.S., K.S. Lee, J.K. Hwangbo, Y.H. You and J.H. Kim. 2004. Selection of tolerant plants and their arrangement to restore a forest ecosystem damaged by air pollution. *Water, Air, and Soil Pollution* **156**: 251-273.
- Lee, M. 2003. Method for assessing forest carbon sink by ecological process-based approach-a case study for Takayama Station, Japan. *Korean Journal of Ecology* **23**: 131-134.
- Lee, S.D., J.W. Choi, J.K. Lee and B.H. Han. 2006. Foundation of Park Management Plan to Consider Ecological Aspects Based on Environment Ecology Research and Analysis in Bulamsan Urban Nature Park. *Korean Journal of Ecology and Environment* **20**: 170-187.
- Litton, C.M., M.G. Ryan and D.H. Knight. 2004. Effects of tree density and stand age on carbon allocation patterns in

- post fire lodgepole pine. *Ecological Applications* **14**: 460-475.
- Lopezaraiza-Mikel, M.E., R.B. Hayes, M.R. Whalley and J. Memmott. 2007. The impact of an alien plant on a native plant-pollinator network: an experimental approach. *Ecology Letters* **10**: 539-550.
- Ministry of Environment. 2011. Sectional impact on atmospheric carbon budget over Korea: environmental policy support. MOE, Gwacheon.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2013. City park. Green Area Planning Division. Seoul.
- Miller, R.W. 1997. Urban Forest: Planning and Managing Urban Greenspaces. Prentice Hall, Upper River, New Jersey.
- Na, G.S. 1997. Mountain of Seoul. The City History Compilation Committee Of Seoul, Seoul.
- National Research Council. 1991. The Restoration of Aquatic Ecosystems: Science, Technology, and Public Policy. National Academy Press, Washington.
- O'Meara, M. 1999. Reinventing Cities for People and the Planet. Worldwatch, Washington.
- 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, E.J. 2009. Quantification of CO₂ Uptake by Urban Trees and Greenspace Management for C Sequestration. Gyeonggi Research Institute, Suwon.
- 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.
- Raich, J.W. and A. Tufekcioglu. 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry* **48**: 71-90.
- Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and carbon cycle. *Global Change Biology* **1**: 77-91.
- Society for Ecological Restoration International. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration, www.ser.org and Tucson, Society for Ecological Restoration International.
- Tallamy, D.W. 2004. Do alien plants reduce insect biomass? *Conservation Biology* **18**: 1-4.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2014. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Methodology. United Nations, New York.
- United Nations Environment Programme. 2009. Climate change science compendium. UNEP, New York.
- Vitousek, P.M., C.M. D'antonio, L.L. Loope, M. Rejmanek and R. Westbrooks. 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zealand Journal of Ecology* **21**: 1-16.
- Whittaker, R.H. and P.L. Marks. 1975. Methods of assessing terrestrial productivity, In: Lieth, H. and R.H. Whittaker, ed. Primary Productivity of the Biosphere. Springer-Verlag, New York.