

공공용지 녹지의 탄소저감과 증진방안[†]

조현길* · 박혜미** · 김진영**

*강원대학교 생태조경디자인학과 교수 · **강원대학교 생태조경디자인학과 강사

Carbon Reduction and Enhancement for Greenspace in Institutional Lands

Jo, Hyun-Kil* · Park, Hye-Mi** · Kim, Jin-Young**

*Professor, Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University

**Lecturer, Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University

ABSTRACT

This study quantified annual uptake and storage of carbon by urban greenspace in institutional lands and suggested improvement of greenspace structures to enhance carbon reduction effects. The study selected a total of five study cities including Seoul, Daejeon, Daegu, Chuncheon, and Suncheon, based on areal size and nationwide distribution. Horizontal and vertical greenspace structures were field-surveyed, after institutional greenspace lots were selected using a systematic random sampling method on aerial photographs of the study cities. Annual uptake and storage of carbon by woody plants were computed applying quantitative models of each species developed for urban landscape trees and shrubs. Tree density and stem diameter (at breast height) in institutional lands averaged 1.4 ± 0.1 trees/100 m² and 14.9 ± 0.2 cm across the study cities, respectively. Of the total planted area, the ratio of single-layered planting only with trees, shrubs, or grass was higher than that of multi-layered structures. Annual uptake and storage of carbon per unit area by woody plants averaged 0.65 ± 0.04 t/ha/yr and 7.37 ± 0.47 t/ha, which were lower than those for other greenspace types at home and abroad. This lower carbon reduction was attributed to lower density and smaller size of trees planted in institutional lands studied. Nevertheless, the greenspace in institutional lands annually offset carbon emissions from institutional electricity use by 0.6 (Seoul)~1.9% (Chuncheon). Tree planting in potential planting spaces was estimated to sequester additionally about 18% of the existing annual carbon uptake. Enhancing carbon reduction effects requires active tree planting in the potential spaces, multi-layered/clustered planting composed of the upper trees, middle trees and lower shrubs, planting of tree species with greater carbon uptake capacity, and avoidance of the topiary tree maintenance. This study was focused on finding out greenspace structures and carbon offset levels in institutional lands on which little had been known.

Key Words: Greenspace Structure, Carbon Uptake, Carbon Offset, Potential Planting Space, Multi-layered Planting

국문초록

본 연구는 도시의 공공용지 녹지에 의한 탄소의 연간 흡수 및 저장을 계량화하고, 탄소저감 효과를 증진하기 위한

[†]: 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2017043B10-1919-BB01)의 지원에 의하여 이루어진 것임.
Corresponding author: Hye-Mi Park, Lecturer, Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea, Tel.: +82-33-250-8345, E-mail: bhm63@kangwon.ac.kr

녹지구조의 개선방안을 제시하였다. 연구대상 도시는 규모와 분포지방을 고려하여 서울시, 대전시, 대구시, 춘천시, 순천시 등 총 5개 도시를 표본 선정하였다. 대상 도시의 항공사진 상에서 체계적 임의 표본추출방법을 통해 표본 공공용지를 선정하고, 녹지의 수평적 및 수직적 구조를 실사하였다. 도시 조경수목을 대상으로 개발한 수종별 계량모델을 적용하여, 식재수목에 의한 탄소의 연간 흡수 및 저장량을 산정하였다. 연구대상 공공용지의 교목밀도는 도시들 모두에 걸쳐 평균 1.4 ± 0.1 주/100m²이고, 흉고직경은 14.9 ± 0.2 cm이었다. 녹지의 수직구조는 교목, 관목 또는 잔디만 식재한 단층구조의 비율이 다층구조보다 더 높았다. 식재수목에 의한 단위면적당 연간 탄소흡수량은 평균 0.65 ± 0.04 t/ha/yr이고, 단위면적당 탄소저장량은 7.37 ± 0.47 t/ha로서, 국내·외의 타 녹지공간 유형에 비해 낮은 탄소저감 효과를 보였다. 이는 연구대상 공공용지의 식재수목 밀도와 규격이 상대적으로 저조하기 때문이었다. 그럼에도 불구하고, 공공용지의 녹지는 공공용 전력소비에 따른 탄소배출을 도시에 따라 해마다 0.6(서울)~1.9%(춘천) 상쇄시키는 셈이었다. 잠재식재공간 내 수목식재는 기존 연간 탄소흡수량을 약 18% 추가 증진 가능하였다. 공공용지 녹지의 탄소저감 효과를 증진하기 위해서는 잠재식재공간의 적극적인 수목식재, 상층 교목, 중층 교목 및 하층 관목으로 구성되는 다층 군식의 추진, 탄소흡수 능력이 양호한 교목종의 상층 식재, 상록수종의 토피여리, 관리회피 등이 요구된다. 본 연구는 국내 미진한 공공용지의 녹지구조 및 탄소상쇄를 구명하는데 중점을 두었다.

주제어: 녹지구조, 탄소흡수, 탄소상쇄, 잠재식재공간, 다층식재

I. 서론

기후변화를 야기하는 주요 요인 중의 하나는 대기 탄소농도의 증가로서, 세계의 각 국가는 저탄소 사회를 구현하기 위한 다양한 정책적 대책을 수립 및 실행하고 있다. 국내에서는 2019년 제2차 기후변화대응 기본계획을 수립하고, 2030년까지 2017년 대비 온실가스를 24.4% 감축하는 목표를 설정하였으며, 이 감축 목표에는 탄소흡수원으로서 도시녹지의 확충을 포함한다(http://m.me.go.kr/home/web/policy_data). 대기 탄소농도의 증가는 주로 화석연료 소비와 녹지훼손에 기인한다. 수목과 토양을 포함하는 도시녹지는 수목의 생장과정에서 대기 탄소를 흡수하고 토양의 탄소고정에 기여하므로, 기후변화의 영향을 지연 혹은 완화하는 탄소흡수원으로서 중요한 역할을 담당한다. 세계 각 국가의 탄소중립 및 상쇄프로그램에서도 도시 수목식재를 주요 온실가스 감축활동의 하나로 인정하는 등 그 중요성이 더욱 부각되고 있다.

대기 탄소농도의 저감을 위한 노력은 과거 1990년대부터 도시녹지의 그 효과를 구명하는 연구들(Jo and McPherson, 1995; McPherson, 1998; Jo, 2002; Nowak and Crane, 2002; Liu and Li, 2012; Nowak *et al.*, 2013; Gratani *et al.*, 2016; Jo *et al.*, 2018; 2019a; 2019b)을 태동시켰다. Jo (2002)는 국내 일부 도시를 대상으로 도시녹지의 탄소흡수 및 저장을 계량화하고, 그 효과를 증진할 녹지계획 전략을 강구하였다. Nowak *et al.* (2013)은 미국의 다수 도시를 대상으로 수목의 탄소흡수 및 저장을 산정하고, 미국 전체 도시수목에 의한 탄소저감 효과를 구명하였다. Gratani *et al.* (2016)은 로마에 위치한 공원 4개소를 대상으로 녹지의 탄소 흡수량과 경제가치를 추정하였다. 또한, Jo *et al.* (2018; 2019a; 2019b)은 국내 일부 도시의 가로, 공

원, 공동주거지를 대상으로 식재수목의 탄소저감을 계량화하고, 바람직한 식재방안을 모색한 바 있다.

도시생태계의 탄소흡수 및 저장능을 증진하기 위해서는 도시 전체적 차원에서 녹지공간을 확충하고, 해당 녹지공간 개별적으로는 식재수목의 생장률, 규격, 밀도 등을 개선하는 방안이 필요하다. 도시녹지의 탄소저감 관련 기존 국내·외 연구는 상기한 바와 같이 녹지공간 유형 중 주택단지, 공원, 가로 등을 중심으로 수행되어 왔다. 그러나, 식재 잠재력이 상존하는 공공용지를 대상으로 탄소저감 효과를 구명하고, 녹지의 그 효과를 개선하기 위한 방안을 모색한 연구는 거의 부재하는 상황이다. 본 연구의 목적은 표본 도시를 선정하여 공공용지 녹지의 탄소흡수 및 저장을 계량화하고, 탄소저감 효과를 증진하기 위한 녹지의 구조적 개선방안을 제시하는 것이다. 본 연구에서 공공용지란 학교, 시·구청, 법원, 경찰서 등을 포함하는 토지이용을 의미한다. 그리고, 탄소흡수량은 수목이 한 해 동안 고정된 양을, 탄소저장량은 수목이 다년간 생장하면서 고정한 총량을 각각 지칭한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구대상 도시 및 공공용지 선정

본 연구는 도시 규모에 따라 대도시와 중소도시를 포함하되, 전국 지방별 분포를 고려하여 서울시, 대전시 및 대구시에 추가하여 중소도시로서 춘천시, 순천시 등 총 5개 도시를 표본 선정하였다. 대상 도시별로 축척 1/1,000의 항공사진 상에서 체계적 임의 표본추출방법(systematic random sampling method)을 통해 표본 공공용지를 선정하였다. 즉, 도시 중앙을 교차하

는 8개 방향의 방사형 직선을 작도한 후, 도시 규모에 따라 서울시와 대전시는 40cm, 대구시는 30cm, 춘천시와 순천시는 10cm 간격으로 환상형 원을 작도하였다(Figure 1 참조). 방사형 직선과 환상형 원이 접하는 지점수들 중, 도시별 각 방향에서 최소 10%의 점점에 위치하거나 가장 가까이 분포하는 공공건물을 임의로 표본 추출하였다. 이 표본추출방법은 도시 전체 스케일에서 연구대상 공공용지를 편견없이 임의로 선정하기 위해 고안된 것이다. 연구대상 표본수는 서울시 35개, 대전시 36개, 대구시 35개, 춘천시 35개, 순천시 36개 등 총 177개이었다. 표본수의 결정은 실사에 필요한 비용 및 시간과 조사자료의 통계적 신뢰성이라는 대립적 양면을 가감 조정한 것이다.

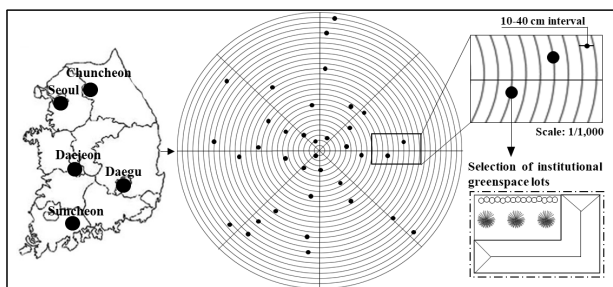


Figure 1. Depiction of systematic random sampling design to select institutional greenspace lots

2. 녹지구조 조사 및 분석

표본 선정한 공공건물을 2017년부터 2019년까지 최근 3년간 현장 방문하여 해당 부지의 면적을 측정하고, 그 부지의 경계 내에 분포하는 수목 전수를 대상으로 수종, 규격, 층위 등을 포함하는 수평적 및 수직적 구조를 실사하였다. 실사 자료를 바탕으로 수목의 밀도, 피도, 직경구조, 상대우점치, 수직구조, 잠재식재공간 등을 분석하였다. 본 연구에서 잠재식재공간은 기존 수목의 수관에 의해 점유되지 않은 자연지반 공간으로서, 가공선, 정화조, 맨홀 등 구조물에 의한 방해 없이 수관폭 2m, 수고 3m 이상 규격의 수목 식재가 가능한 오픈스페이스 면적을 지칭한다. 이들 실사 및 분석자료는 공공용지의 식재수목에 의한 탄소흡수 및 저장을 계량화하고, 탄소저감 효과를 증진하기 위한 녹지구조의 개선방안을 모색하는데 활용하였다.

3. 탄소흡수 및 저장량 산정

도시 식재수목의 탄소흡수 및 저장은 관리, 경합 등을 포함하는 생장환경 차이에 기인하여 밀도 높은 산림수목의 경우와 상이할 수 있다. 따라서, 본 연구는 개방 생장하는 도시의 조경수목을 대상으로 개발한 수종별 계량모델(Jo and Cho, 1998; Jo, 2001; 2002; 2019; Jo and Ahn, 2001; 2012; Jo *et al.*, 2013; 2014; 2019c; 2019d)을 적용하여, 공공용지 수목의 탄소

Table 1. Quantitative model sources of tree and shrub species used to estimate carbon uptake and storage* in this study

Carbon	Species		Diameter range ** (cm)	Reference	
Uptake	Tree	<i>Abies holophylla</i>	5-19	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Acer palmatum</i>	7-27	Jo and Cho, 1998	
			5-20	Jo and Ahn, 2012	
		<i>Camellia japonica</i>	4-10	Jo <i>et al.</i> , 2019d	
		<i>Chionanthus retusus</i>	3-11	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Cornus officinalis</i>	3-15	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Ginkgo biloba</i>	6-31	Jo and Cho, 1998	
			5-25	Jo and Ahn, 2012	
		<i>Ilex rotunda</i>	3-12	Jo <i>et al.</i> , 2019c	
		<i>Lagerstroemia indica</i>	3-14	Jo <i>et al.</i> , 2019d	
		<i>Pinus densiflora</i>	5-29	Jo and Ahn, 2001;	
			5-25	Jo <i>et al.</i> , 2013	
		<i>Pinus koraiensis</i>	5-33	Jo and Ahn, 2001;	
			5-31	Jo <i>et al.</i> , 2013	
		<i>Prunus armeniaca</i>	4-14	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Prunus yedoensis</i>	5-23	Jo and Ahn, 2012	
		<i>Quercus myrsinaefolia</i>	3-17	Jo <i>et al.</i> , 2019d	
		<i>Taxus cuspidata</i>	2-15	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Zelkova serrata</i>	6-34	Jo and Cho, 1998	
			5-28	Jo and Ahn, 2012	
	General hardwoods	3-28	Jo, 2019		
	General softwoods	5-31	Jo, 2019		
	Shrub	<i>Pinus</i> spp.	0.6-3.6	Jo, 2002	
		<i>Rhododendron</i> spp.	0.4-3.4	Jo, 2002	
		General hardwoods	0.4-4.0	Jo, 2001; 2002	
		General softwoods	0.4-4.0	Jo, 2001; 2002	
Storage	Tree	<i>Abies holophylla</i>	5-19	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Acer palmatum</i>	5-20	Jo and Ahn, 2012	
		<i>Camellia japonica</i>	4-10	Jo <i>et al.</i> , 2019d	
		<i>Chionanthus retusus</i>	3-11	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Cornus officinalis</i>	3-15	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Ginkgo biloba</i>	5-25	Jo and Ahn, 2012	
		<i>Ilex rotunda</i>	3-12	Jo <i>et al.</i> , 2019c	
		<i>Lagerstroemia indica</i>	3-14	Jo <i>et al.</i> , 2019d	
		<i>Pinus densiflora</i>	5-25	Jo <i>et al.</i> , 2013	
		<i>Pinus koraiensis</i>	5-31	Jo <i>et al.</i> , 2013	
		<i>Prunus armeniaca</i>	4-14	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Prunus yedoensis</i>	5-23	Jo and Ahn, 2012	
		<i>Quercus myrsinaefolia</i>	3-17	Jo <i>et al.</i> , 2019d	
		<i>Taxus cuspidata</i>	2-15	Jo <i>et al.</i> , 2014	
		<i>Zelkova serrata</i>	5-28	Jo and Ahn, 2012	
		General hardwoods	3-28	Jo, 2019	
		General softwoods	5-31	Jo, 2019	
		Shrub	<i>Pinus</i> spp.	0.6-3.6	Jo, 2002
			<i>Rhododendron</i> spp.	0.4-3.4	Jo, 2002
			General hardwoods	0.4-4.0	Jo, 2001; 2002
	General softwoods		0.4-4.0	Jo, 2001; 2002	

*Carbon uptake and storage indicate annual carbon fixation and total carbon accumulation over growth time, respectively.

**Stem diameter at breast height of 1.2 m (dbh) for trees and diameter at 15 cm above ground for shrubs (2 cm or less in dbh).

흡수 및 저장량을 산정하였다. 즉, 도시수목의 계절별 CO₂ 교환을 측정이나 근굴취를 포함한 직접수확법을 통해 개발한 계량모델에(Table 1 참조) 주요 독립변수로서 수목 개체별로 실측한 흉고직경 또는 근원직경을 대입하여 계량화하였다. 해당 계량모델이 부재하는 일부 수종의 경우는 동일 속 또는 성상의 계량모델들을 대용하여 그 평균치를 산출하였다. 각 공공용지의 면적과 수목피도를 반영하여 단위면적당, 단위수목피도당 평균 탄소흡수 및 저장량을 산정한 후, 이 지표를 연구대상 도시별 전체 공공용지 면적(KEPC, 2019)에 적용하여 총 탄소흡수 및 저장량을 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 공공용지의 녹지구조

연구대상 공공용지의 총면적 중 수목과 잔디 및 타 초본으로 피복된 자연지반의 녹지면적 점유비는 춘천시에서 가장 높은 23.1%이고, 이어서 대구시 21.4%, 순천시 20.2%, 대전시 16.5%, 서울시 14.6% 등의 순이었다. 공공용지에 식재한 교목의 밀도는 연구대상 도시에 따라 1.2(춘천 및 순천)~1.6주/100m²(대전)로서, 도시들 모두에 걸쳐 평균 1.4±0.1주/100m²이었다(Table 2 참조). 관목을 포함한 수목의 피도는 평균 13.2±0.8%로서, 도시에 따라 11.4(순천)~16.4%(대전)이었다. 기존 연구에 의하면, 국내 공동주택지에서 교목밀도와 수목피도가 각각 평균 2.5주/100m² 및 23.0%이고(Jo *et al.*, 2019a), 미국과 캐나다 도시들의 교목피도는 각각 23.8% 및 26.1%이었다(Nowak *et al.*, 2013; McGovern and Pasher, 2016). 연구대상 공공용지의 식재수량은 국내 공동주택지의 약 56% 수준이고, 국외 도시에 비하면 더 낮은 수준에 해당한다.

Table 2. Density and cover of trees planted in institutional lands for study cites

City	Seoul	Daejeon	Daegu	Chuncheon	Suncheon	Total
Density (no./100m ²)	1.3±0.2	1.6±0.2	1.4±0.2	1.2±0.2	1.2±0.1	1.4±0.1
Cover* (%)	13.5±1.5	16.4±2.8	12.9±1.4	11.8±1.8	11.4±1.2	13.2±0.8

*It includes shrubs.

식재교목 전체의 흉고직경은 평균 14.9±0.2cm이고, 흉고직경 급 분포의 경우 20cm 미만이 약 72%를, 그리고 30cm 미만이 93%를 점유하였다(Figure 2 참조). 영국의 일부 주거지에 식재한 수목들 중 흉고직경 20cm 미만의 점유비는 약 50%로서(Rumble *et al.*, 2015), 연구대상 공공용지에 분포하는 소형 수목의 비율은 이보다 1.4배 높다. 녹지의 수직구조는 교목, 관목 또는 잔디만 식재한 단층구조의 비율이 도시들 모두에 걸쳐 52.2%로서, 교목, 관목 및 초본을 함께 식재한 다층구조의

47.8%보다 더 높았다(Table 3 참조). 단층구조의 비율 중 교목 식재가 부재하는 관목이나 잔디만의 식재면적은 약 20%를 점유하였다. 국내 공동주택지에서는 교목과 관목의 다층구조 비율이 전체 식재면적의 75%를 차지하였는데(Jo *et al.*, 2019a), 연구대상 공공용지의 경우는 이 결과의 약 64% 수준인 것으로 분석된다.

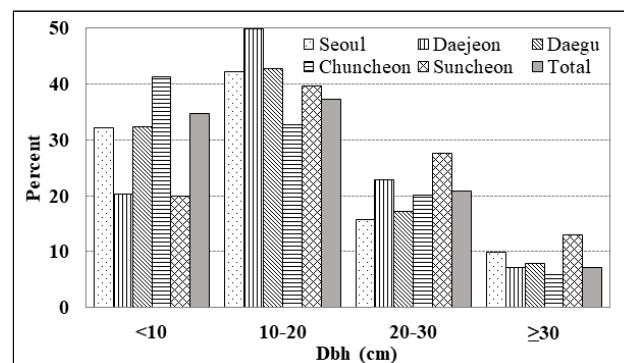


Figure 2. Dbh* distribution of trees planted in institutional lands for study cites

*: Stem diameter at breast height of 1.2 m.

Table 3. Vertical structures of greenspaces in institutional lands for study cites

City	Single-layered (%)			Multi-layered (%)		
	Trees	Shrubs	Grass	Trees & shrubs	Trees, shrubs & grass	Trees, shrubs & herbaceous
Seoul	47.2	7.0	0.8	43.4	1.6	-
Daejeon	40.3	3.7	7.0	34.4	14.6	-
Daegu	36.7	3.7	10.4	15.3	29.0	4.9
Chuncheon	49.0	2.0	10.8	20.4	17.6	0.2
Suncheon	44.6	2.5	2.3	30.7	13.2	6.7
Total	41.8	3.3	7.1	25.8	18.6	3.4

생장 중인 수목의 단위면적당 탄소흡수 및 저장량은 식재수량과 직경크기에 비례한다(Jo and Park, 2017; Jo *et al.*, 2019b). 그러나, 연구대상 공공용지에서는 상기한 바와 같이 수목밀도 및 피도를 포함하는 식재수량이 기존 국내·외 연구결과에 비해 상대적으로 적고, 식재수목은 대체로 소형 내지는 성장과정의 개체들이 우점하였다. 또한, 전체 녹지공간 중 다층식재 면적이 단층식재보다 적었고, 다층구조임에도 증층 교목의 식재가 미흡한 것으로 나타났다. 하층, 중층 및 상층으로 구성되는 수목의 다층식재는 단위면적당 식재수량을 증진하는데 바람직한 식재기법이다. 연구대상 도시별로 상대우점치가 상위 10위권 내인 수종들 중 공통적으로 식재된 주요 수종은 느티나무(*Zelkova serrata*), 소나무(*Pinus densiflora*), 단풍나무(*Acer*

palmatum), 은행나무(*Ginkgo biloba*), 왕벚나무(*Prunus yedoensis*) 및 산철쭉(*Rhododendron yedoense* var. *poukhanense*)이었다. 상대우점치 상위 20위권 내의 공통 식재수종을 추가하면, 향나무(*Juniperus chinensis*), 주목(*Taxus cuspidata*), 이팝나무(*Chionanthus retusa*) 등이었다. 이들은 국내 도시에 흔히 식재되는 수종인데, 교목종 중 느티나무와 왕벚나무의 탄소흡수 능력은 상대적으로 높은 반면, 주목과 향나무의 경우는 낮은 것으로 보고된다(Jo and Park, 2017).

2. 공공용지의 탄소흡수 및 저장

공공용지의 식재수목에 의한 단위면적당 탄소흡수량은 연구대상 도시에 따라 0.62~0.68t/ha/yr으로서, 도시들 모두에 걸쳐 평균 0.65±0.04t/ha/yr이고, 단위수관면적당 평균 탄소흡수량은 0.47±0.02kg/m²/yr이었다(Table 4 참조). 단위면적당 탄소저장량은 도시에 따라 6.82(순천)~7.86t/ha(서울)으로서 평균 7.37±0.47t/ha이고, 단위수관면적당 평균 탄소저장량은 5.33±0.22kg/m²이었다. 기존 연구(Jo, 2002)에 의하면, 국내 일부 도시들의 단위면적당 및 단위수관면적당 탄소흡수량은 각각 0.56~0.80t/ha/yr, 0.39~0.61kg/m²/yr이고, 단위면적당 탄소저장량은 4.7~7.2t/ha이었다. 도시지역 스케일의 이들 결과에 비하면, 연구대상 공공용지의 탄소흡수량은 유사하고 탄소저장량은 약간 더 많다. 한편, 국내 공동주거지의 식재수목에 의한 단위면적당 평균 탄소흡수량은 1.1t/ha/yr이고(Jo *et al.*, 2019a), 서울시 공원의 경우는 3.5t/ha/yr인(Jo *et al.*, 2019b) 것으로 보고된다. 즉, 연구대상 공공용지의 탄소흡수량은 공동주거지의 약 60% 수준이고, 공원의 20% 수준에 불과하다. 이러한 차이는 식재수종의 생장률과도 유관하지만, 특히 공공용지에서 단위면적당 식재수량과 식재수목 규격이 상대적으로 저조함에 기인한다.

Table 4. Carbon uptake and storage per unit area by trees and shrubs planted in institutional lands for study cities

City	Carbon uptake		Carbon storage	
	Per land area (t/ha/yr)	Per tree cover (kg/m ² /yr)	Per land area (t/ha)	Per tree cover (kg/m ²)
Seoul	0.65±0.08	0.44±0.03	7.86±1.03	5.05±0.47
Daejeon	0.66±0.07	0.46±0.04	7.37±1.06	5.10±0.53
Daegu	0.68±0.09	0.52±0.04	7.69±1.21	5.59±0.54
Chuncheon	0.63±0.13	0.46±0.03	7.22±1.20	5.55±0.47
Suncheon	0.62±0.06	0.48±0.03	6.82±0.76	5.29±0.45
Total	0.65±0.04	0.47±0.02	7.37±0.47	5.33±0.22

공공용지 전체 면적의 탄소흡수량은 연구대상 도시의 공공용지 규모 및 단위면적당 흡수량 차이에 따라 약 0.2(순천)~

3kt/yr(서울)이고, 도시들 모두를 합하면 총 6kt/yr이었다(Table 5 참조). 공공용지 전체 면적의 탄소저장량은 도시에 따라 약 2~34kt으로서 합계 64kt이었다. 연구대상 도시별 공공용 전력소비량을 합산하면 2018년 기준 총 5,872,790MWh/yr이었다(KEPC, 2019). 전력소비의 탄소배출계수는 0.127t/MWh로서(KEP, 2016), 이를 적용한 도시들 모두의 연간 탄소배출량은 약 746kt/yr이었다. 즉, 연구대상 도시들의 공공용지 녹지는 공공용 전력소비에 따른 탄소배출을 해마다 0.8% 상쇄시키는 것으로 나타났다(Table 5 참조). 도시별 탄소상쇄 효과는 0.6(서울)~1.9%(춘천)로서 탄소배출량의 다소에 따라 변이를 보였다. 국내 1인당 공공용 전력소비에 따른 탄소배출량을 산출하면 57.9kg/인으로서(KEP, 2016; KEPC, 2019; KSPI, 2019), 연구대상 도시들의 공공용지 녹지는 약 100,000명이 해마다 배출하는 탄소량을 상쇄시키는 셈이었다.

Table 5. Carbon reduction effects of greenspaces in overall institutional lands for study cities

City	Uptake (kt/yr)	Storage (kt)	Emission* (kt/yr)	Offset** (%)
Seoul	3	34	490	0.6
Daejeon	1	11	121	0.8
Daegu	1	12	93	1.1
Chuncheon	0.5	5	27	1.9
Suncheon	0.2	2	15	1.3
Total	6	64	746	0.8

* Annual carbon emissions from institutional electricity use.

** Annual carbon offset by institutional greenspaces.

3. 녹지구조의 개선방안

연구대상 공공용지의 탄소흡수량은 상기한 바와 같이 건물과 녹지공간이 상존하는 공동주거지의 경우보다 훨씬 적게 나타났다. 이러한 차이의 주 요인은 상대적으로 식재수목의 밀도가 낮고 규격이 작기 때문이다. 따라서, 공공용지의 탄소저감 효과를 증진하기 위해서는 녹지면적을 확충하되, 수목밀도 및 규격 관련 녹지구조의 개선을 요구한다. 공공용지의 제한된 녹지공간에서, 소형 수목이나 잔디 위주의 식재를 회피하고, 수목 밀도를 증진할 방안은 기존 녹지의 수직구조 중 약 52%를 점유하는 단층구조를 상층 교목, 중층 교목 및 하층 관목으로 구성되는 다층 군식의 구조로 전환하는 것이다(Figure 3 참조). 공공용지의 건물 주변 식재와 관리 상 특징은 향나무, 주목 등 상록수종의 단층 단식 및 토피어리 위주의 경관이었다. 이들 수종은 생장에 따른 탄소흡수 능력이 상대적으로 저조하고(Jo and Park, 2017), 토피어리 관리는 수관 생장을 제한하여 탄소흡수 기회에 불리하다. 따라서, 연간 생장률 및 탄소흡수 능력이 양호한 느티나무, 왕벚나무 등(Jo and Park, 2017)의 교목

종을 다층으로 추식하여 경관 다양성도 개선함이 바람직하다 (Figure 3 참조).

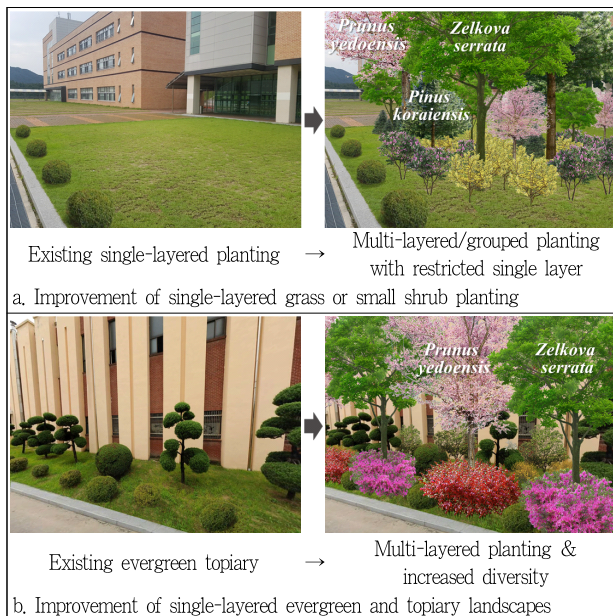


Figure 3. Model of multi-layered and grouped planting including desirable tree species to enhance carbon reduction per unit area

연구대상 공공용지의 녹지면적 중, 수관폭 2m 및 수고 3m 이상 규격의 수목을 식재 가능한 잠재식재공간 점유비는 서울시에서 가장 높은 15.7%이고, 이어서 대구시 14.1%, 대전시 13.2%, 춘천시 12.8%, 순천시 7.4% 등의 순이었다. 잠재식재공간은 식재공간 낭비를 최소화하면서 식재수량을 실질적으로 확충할 수 있는 대상으로서, 수목의 다층 군식을 적극 추진하여 공공용지 녹지의 탄소저감 효과를 증진할 필요가 있다. 이 잠재식재공간에 상기한 규격 이상의 수목식재는 표본도시별 기존 탄소흡수량의 춘천시 25.3%, 대구시 23.3%, 서울시 17.0%, 대전시 13.3%, 순천시 13.0%를 추가 증진 가능한 것으로 나타났다. 연구대상 도시 모두를 합산하면, 잠재식재공간은 약 205ha로서 공공용지 녹지면적의 12.0%를 차지하고, 추가 증진 가능한 탄소흡수량은 기존 대비 17.9%에 상당하였다. 이러한 결과는 공공용지 녹지면적의 별도 확충에 앞서, 우선적으로 기존 녹지면적 내의 식재 가능한 공간을 다층 군식과 더불어 적극 활용하는 방안이 탄소저감에 효율적임을 시사한다.

IV. 결론

현 시대의 국제적인 주요 환경 관심사는 기후변화 대응을 위한 저탄소 사회의 창출이다. 탄소배출은 수목벌채와 화석연료 소비에 기인하므로, 도시의 저탄소 정책은 곧 녹지확충과 화석

연료 절약을 요구한다. 수목식재를 통한 녹지확충은 대체에너지 개발보다 비용과 시간 측면에서 더 효율적일 수 있다. 본 연구는 서울시, 대전시, 대구시, 춘천시, 순천시 등 총 5개의 대도시와 중소도시를 표본 선정하여, 공공용지 녹지를 대상으로 탄소흡수 및 저장을 계량화하고, 그 효과를 증진하기 위한 녹지구조의 개선방안을 모색하였다. 본 연구수행은 도시의 필수 토지이용인 공공용지의 녹지가 도시 전체의 탄소저감에 기여할 수 있으나, 해당 연구가 부재하여 유관 정보를 구축할 필요성에서 비롯되었다.

연구대상 도시들의 공공용지 식재수목에 의한 단위면적당 탄소흡수량은 평균 $0.65 \pm 0.04 \text{ t/ha/yr}$ 이고, 단위면적당 탄소저장량은 $7.37 \pm 0.47 \text{ t/ha}$ 로서, 국내·외의 타 녹지공간 유형에 비해 낮은 탄소저감 효과를 보였다. 예를 들면, 연구대상 공공용지의 탄소흡수량은 공동주택지의 약 60% 수준이고, 공원의 20% 수준에 불과하였다. 이러한 결과의 주요한 사유는 공공용지에서 단위면적당 식재수량과 식재수목 규격이 상대적으로 저조하기 때문이었다. 그럼에도 불구하고, 공공용지의 녹지는 공공용 전력소비에 따른 탄소배출을 도시에 따라 해마다 최소 0.6(서울)~최대 1.9%(춘천) 상쇄시키는 셈이었다.

녹지면적 내의 잠재식재공간은 연구대상 도시들 함께 약 205ha로서, 추가 증진 가능한 탄소흡수량은 기존 대비 약 18%에 상당하였다. 따라서, 공공용지의 탄소저감 효과를 증진하기 위해서는 잠재식재공간에 적극적으로 수목을 식재하는 방안을 요구한다. 또한, 녹지면적의 50% 이상을 점유하는 소형 수목이나 잔디 위주의 기존 단층구조는 상층 교목, 중층 교목 및 하층 관목으로 구성되는 다층 군식의 구조로 개선하여, 식재수목의 밀도와 규격을 증강할 필요가 있다. 다층 군식의 상층에는 탄소흡수 능력이 양호한 교목종을 배식하고, 탄소흡수를 제한하는 소형 상록수종의 토피어리 관리는 회피함이 바람직하다. 이들 연구결과는 국토교통부 조경기준, 환경부 생태면적을 등의 관련 법제에 활용되어, 현장에 적용할 수 있도록 제도화하는 방안이 필요할 것이다.

정부에서는 저탄소 정책의 일환으로서 도시숲 조성을 통해 탄소흡수원의 확충을 추진하고 있다. 녹지구조의 탄소저감 및 개선방안을 포함하는 본 연구결과가 학교숲을 포함한 도시숲의 조성에 유용하길 기대한다. 본 연구에서 표본 선정한 5개 도시가 국내 전체 도시의 공공용지 녹지구조 및 탄소저감을 대변하지 못할 수 있다. 향후 도시 표본수의 추가와 단독주거지 정원을 비롯한 타 녹지공간 유형의 보강 연구를 통해, 국내 도시 녹지의 탄소저감 효과를 포괄적으로 계량화하고 최적 계획방안을 강구할 필요가 있다.

References

1. Gratani, L., L. Varone and A. Bonito(2016) Carbon sequestration of

- four urban parks in Rome, Urban Forestry & Urban Greening 19: 184-193.
2. Jo, H. K. and D. H. Cho(1998) Annual CO₂ uptake by urban popular landscape tree species, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 26(2): 38-53.
 3. Jo, H. K. and E. G. McPherson(1995) Carbon storage and flux in urban residential greenspace, Journal of Environmental Management 45: 109-133.
 4. Jo, H. K. and H. M. Park(2017) Changes in growth rate and carbon sequestration by age of landscape trees, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 45(5): 97-104.
 5. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2001) Annual CO₂ uptake and atmospheric purification by urban coniferous trees - For *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*, Korean Journal of Environment and Ecology 15(2): 118-124.
 6. 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(5): 160-168.
 7. Jo, H. K.(2001) Indicator for CO₂ Uptake and Atmospheric Purification Evaluation of Vegetation, Development of Eco-Indicators for Sustainable Development, Research Report to Ministry of Environment.
 8. Jo, H. K.(2002) Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea, Journal of Environmental Management 64: 115-126.
 9. Jo, H. K.(2019) Development of Model and Technology for Establishment, Management and Evaluation of Urban Forests in Living Zone to Improve Carbon Sequestration Sources and Multi-dimensional Benefits against New Climate Change Regime, Research Report to Korea Forest Service.
 10. Jo, H. K., H. M. Park and J. Y. Kim(2019a) Carbon offset service and design guideline of tree planting for multifamily residential sites in Korea, Sustainability 11(13): 3543.
 11. Jo, H. K., J. Y. Kim and H. M. Park(2013) Carbon storage and uptake by evergreen trees for urban landscape - For *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*, Korean Journal of Environment and Ecology 27(5): 571-578.
 12. Jo, H. K., J. Y. Kim and H. M. Park(2014) Carbon reduction effects of urban landscape trees and development of quantitative models - For five native species, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 42(5): 13-21.
 13. Jo, H. K., J. Y. Kim and H. M. Park(2018) Carbon storage and uptake by street trees in Seoul, Journal of Forest and Environmental Science 34(2): 162-164.
 14. Jo, H. K., J. Y. Kim and H. M. Park(2019b) Carbon reduction and planning strategies for urban parks in Seoul, Urban Forestry & Urban Greening 41: 48-54.
 15. Jo, H. K., J. Y. Kim and H. M. Park(2019c) Carbon reduction services of evergreen broadleaved landscape trees for *Ilex rotunda* and *Machilus thunbergii* in Southern Korea, Journal of Forest and Environmental Science 35(4): 240-247.
 16. Jo, H. K., S. H. Kil, H. M. Park and J. Y. Kim(2019d) Carbon reduction by and quantitative models for landscape tree species in southern region - For *Camellia japonica*, *Lagerstroemia indica*, and *Quercus myrsinaefolia*, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 47(3): 31-38.
 17. KEP(Korea Environment Corporation)(2016) Guidelines for Local Government Greenhouse Gas Inventories, Incheon.
 18. KEPC(Korea Electric Power Corporation)(2019) Statistics of Electric Power in Korea, Naju.
 19. KSPI(Korea Statistics Promotion Institute)(2019) Korea Statistical Yearbook, Daejeon.
 20. Liu, C. and X. Li(2012) Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China, Urban Forestry & Urban Greening 11: 121-128.
 21. McGovern, M. and J. Pasher(2016) Canadian urban tree canopy cover and carbon sequestration status and change 1990-2012, Urban Forestry & Urban Greening 20: 227-232.
 22. McPherson, E. G.(1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest, Journal of Arboriculture 24(4): 215-223.
 23. Nowak, D. J. and D. E. Crane(2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA, Environmental Pollution 116: 381-389.
 24. Nowak, D. J., E. J. Greenfield, R. E. Hoehn and E. Lapoint(2013) Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States, Environmental Pollution 178: 229-236.
 25. Rumble, H., K. Rogers, K. J. Doick and T. Hutchings(2015) A comparison of urban tree populations in four UK town and cities, Proceedings of Trees, People and the Built Environment II, Edinburgh: Institute of Chartered Foresters, pp. 181-195.
 26. http://m.me.go.kr/home/web/policy_data

Received : 06 July, 2020

Revised : 21 July, 2020

(1st)

Accepted : 21 July, 2020

3인익명 심사필