

조경수목의 수령에 따른 생장율과 탄소흡수량 변화[†]

조현길* · 박혜미**

*강원대학교 생태조경디자인학과 · **강원대학교 대학원 조경학과

Changes in Growth Rate and Carbon Sequestration by Age of Landscape Trees

Jo, Hyun-Kil* · Park, Hye-Mi**

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

**Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University

ABSTRACT

Greenspace enlargement through proper landscape planting is essential to creating a low carbon society. This study analyzed changes in stem diameter growth rates(DGR), ratios of below ground/above ground biomass(B/A), and carbon sequestration by age of major landscape tree species. Landscape trees for study were 11 species and 112 individuals planted in middle region of Korea. The DGR and B/A were analyzed based on data measured through a direct harvesting method including root digging. The carbon sequestration by tree age was estimated applying the derived regression models. The annual DGR at breast height of trees over 30 years averaged 0.72 cm/yr for deciduous species and 0.83 cm/yr for evergreen species. The B/A of the trees over 30 years averaged 0.23 for evergreen species and 0.40 for deciduous species, about 1.7 times higher than evergreen species. The B/A by age in this study did not correspond to the existing result that it decreased as tree ages became older. Of the study tree species, cumulative carbon sequestration over 25 years was greatest with *Zelkova serrata*(198.3 kg), followed by *Prunus yedoensis*(121.7 kg), *Pinus koraiensis*(117.5 kg), and *Pinus densiflora* (77.4 kg) in that order. The cumulative carbon sequestration by *Z. serrata* offset about 5% of carbon emissions per capita from household electricity use for the same period. The growth rates and carbon sequestration for landscape trees were much greater than those for forest trees even for the same species. Based on these results, landscape planting and management strategies were explored to improve carbon sequestration, including tree species selection, planting density, and growth ground improvement. This study breaks new ground in discovering changes in growth and carbon sequestration by age of landscape trees and is expected to be useful in establishing urban greenspaces towards a low carbon society.

Key Words: Low Carbon, Tree Species, Biomass Ratio, Cumulative, Planting

국문초록

적합한 조경식재를 통한 녹지 확충은 저탄소 사회를 구현하는데 필수적 역할이다. 본 연구는 주요 조경수종의 수령에

[†]: 본 논문은 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호: 2017043B10-1719-BB01)’의 지원에 의하여 수행된 연구의 일부임.

Corresponding author: Hye-Mi Park, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea, Tel.: +82-33-250-8345, E-mail: bhm63@kangwon.ac.kr

따른 줄기 직경 생장률, 지하부/지상부 생체량비 및 탄소흡수량의 변화를 분석하였다. 연구대상 수목은 중부지방에 식재된 11개 수종 및 112개체이었다. 줄기 직경 생장률과 지하부/지상부 생체량비는 근굴취를 포함한 직접수확법을 통해 측정된 자료를 바탕으로 분석하였다. 수령에 따른 탄소흡수량 변화는 유도한 계량모델을 적용하여 산정하였다. 연구대상 수목의 수령 30년에 걸친 연간 흉고직경 생장률은 낙엽수 평균 0.72cm/년 및 상록수 0.83cm/년이었다. 수령 전체의 지하부/지상부 생체량비는 낙엽수 평균 0.40 및 상록수 0.23으로서, 낙엽수의 뿌리 생체량은 상록수보다 약 1.7배 많았다. 수령별 그 생체량비는 수령 증가에 따라 감소한다는 기존 연구 결과와 상이하였다. 수령 25년까지의 누적 탄소흡수량은 느티나무가 198.3kg으로서 가장 많았고, 이어서 왕벚나무 121.7kg, 잣나무 117.5kg, 소나무 77.4kg 등의 순이었다. 느티나무의 누적 탄소흡수량은 동일 기간 가정용 전력소비에 따른 1인당 탄소배출량의 약 5%를 상쇄하는 셈이었다. 연구대상 조경수의 생장률과 탄소흡수능은 동일 수종의 산림수목보다 훨씬 양호하였다. 연구 결과에 근거하여, 수종 선정, 식재밀도, 생장지 반 조성 등을 포함하여 탄소흡수를 증진하기 위한 조경식재 및 관리방안을 모색하였다. 본 연구는 수령에 따른 조경수의 생장 및 탄소흡수 변화를 구명하는 초석 연구로서 저탄소 도시녹지 조성에 유용하길 기대한다.

주제어: 저탄소, 수종, 생체량비, 누적, 식재

I. 서론

저탄소 생활환경의 구현은 현재 국제적인 최대 관심사 중의 하나로서, 세계 국가는 녹지, 토지이용, 교통, 에너지, 자원 등을 포괄하는 다방면에서 대기 탄소농도를 최소화하기 위한 노력을 경주하는 상황이다. 국내에서는 이러한 국제적 동향에 대응하기 위해, 탄소흡수원 증진과 온실가스 배출권 거래의 근간이 되는 저탄소 녹색성장 기본법을 2010년부터 제정 및 시행하고 있다(<http://www.law.go.kr>). 2015년 UN 당사국총회에서 교토의정서를 대체할 신기후체제로서 파리협정이 채택된 이후, 정부는 2030년 온실가스 배출 전망치 대비 37% 감축을 목표로 설정하고, 이를 달성할 제1차 기후변화 대응 기본계획을 수립한 바 있다(Cheong Wa Dae, 2016). 이 기본계획은 신재생에너지 이용뿐만 아니라, 신규 탄소흡수원 조성 및 흡수계수 개발 등의 세부 추진전략을 제시하고 있다.

저탄소 추구는 탄소저감 및 탄소흡수를 포괄하는 활동으로서, 탄소저감은 화석연료 절약과 신재생에너지 이용을 요구하며, 탄소흡수는 녹지조성 및 보전을 통해서만 가능하다. 조경분야에서는 적합한 조경수종 선정 및 식재기법에 의한 도시녹지의 확충을 통해 탄소흡수원 증진에 일조할 필요가 있다. 탄소흡수원으로서 도시 조경수목의 역할이 강조되면서, 국외에서는 수종별 규격, 생장률, 밀도 등에 따른 탄소흡수를 계량화하는 모델을 개발하고(Nowak, 1994; Jo and McPherson, 1995; Nowak and Crane, 2002), 이를 용이하게 평가할 수 있는 컴퓨터 프로그램에 탑재하여(<http://www.itreetools.org>), 도시녹지 조성지침 및 정책 수립에 유용하게 활용하고 있다. 국내의 경우, 과거 산림수목을 중심으로 수간제적이나 생체량의 측정을 통해 생장에 따른 탄소흡수를 연구하여 왔다(Jo and Ahn, 2000; KFRI, 2010). 도시수목은 관리, 경합 등 생장환경이 산림수목과 상이하므로, 산림수목의 탄소흡수를 도시수목에 적용

하는 것은 상당한 오차를 야기한다(Jo and Cho, 1998; Jo and Ahn, 2001). 이러한 견지에서, 최근 도시 조경수목을 대상으로 근굴취를 포함하는 직접수확법에 의해 수종별 생장에 따른 탄소흡수를 용이하게 계량화하는 모델들을 개발한 바 있다(Jo and Ahn, 2012; Jo *et al.*, 2013; 2014).

이들 조경수종 대상의 계량모델은 흉고직경을 독립변수로 탄소흡수량을 산출하고, 동일 직경의 수종 간 그 차이를 비교하는데 유용하다. 그러나, 동일 수령에 따른 수종 간 탄소흡수량 차이나 일정 수령에 도달하기까지 흡수한 누적탄소량을 파악할 수 없고, 어떤 수종의 탄소흡수능이 상대적으로 양호한지 파악하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 국내 주요 조경수종을 대상으로 수령에 따른 직경 생장률, 지하부/지상부 생체량비 및 탄소흡수량의 변화를 분석하고, 수종 선정을 비롯하여 탄소흡수를 증진하기 위한 조경식재 및 관리의 기반정보를 제공하는 것이다. 직경 생장률은 수령별 생장추이에 따른 탄소흡수능 분석은 물론 생장환경 관련 식재와 관리에 응용할 수 있다. 지하부/지상부 생체량비는 난이한 근굴취 대신 지상부만의 생체량으로부터 수령별 지하부 생체량 및 탄소흡수를 계량화하는데 유용한 기반정보이다. 조경수의 연륜에 따른 탄소흡수량 산정을 비롯한 이들 내용은 국내의 경우, 신규 연구로서, 조경수종별 생장추이와 탄소흡수능을 이해하고, 식재효과를 증진하는데 실용적일 것으로 기대한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구대상 조경수종

연구대상 수목은 국내 중부지방에 조경수로 흔히 식재되는 향토수종으로서, 기존 연구(Jo and Ahn, 2012; Jo *et al.*, 2013; 2014)에서 직접수확법을 통해 생체량을 분석하기 위해 선정된

11개 수종이고, 수종별 최소 10개체씩 총 112개체이었다. 즉, 대상 수종은 단풍나무(*Acer palmatum*), 이팝나무(*Chionanthus retusus*), 산수유(*Cornus officinalis*), 은행나무(*Ginkgo biloba*), 살구나무(*Prunus armeniaca*), 왕벚나무(*Prunus yedoensis*), 느티나무(*Zelkova serrata*) 등 7개 낙엽수종과 전나무(*Abies holophylla*), 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 주목(*Taxus cuspidata*) 등 4개 상록수종이었다. 대상 수목은 중부지방의 정원, 가로변, 조경수 농장 등의 개방공간에서 수관 등이 정상적으로 성장하는 것들로서, 흉고직경은 최소 3.1~최대 30.9cm이었다(Table 1 참조).

Table 1. Tree and growth place of study species

Tree species	Dbh* (cm)	Height (m)	Place
<i>Acer palmatum</i>	4.9~19.6	4.3~8.3	Garden, nursery
<i>Abies holophylla</i>	5.0~19.2	3.0~7.5	Nursery
<i>Chionanthus retusus</i>	3.1~10.5	3.7~8.6	Nursery
<i>Cornus officinalis</i>	2.8~15.2	1.7~5.4	Nursery
<i>Ginkgo biloba</i>	5.0~25.0	4.3~11.4	Garden
<i>Prunus armeniaca</i>	3.6~14.3	3.6~7.6	Nursery
<i>Prunus yedoensis</i>	4.8~23.0	3.8~7.5	Garden, nursery, street
<i>Pinus densiflora</i>	5.3~24.6	2.8~10.4	Garden
<i>Pinus koraiensis</i>	5.3~30.9	3.6~13.3	Garden
<i>Taxus cuspidata</i>	2.1~15.2	1.0~4.3	Garden, nursery
<i>Zelkova serrata</i>	5.1~28.0	4.5~10.2	Garden, nursery, street

* Stem diameter at ground level for *C. officinalis* and *T. cuspidata*, and at breast height of 1.2 m (dbh) for the other species (the same with Tables 2, 4 and 5)

2. 수령별 생장률과 생체량비 분석

수령별 직경 생장률은 연구대상 수목의 벌목 당시 지상 1.2m의 흉고부위에서 채취한 두께 5~10cm의 줄기 원판(Jo and Ahn, 2012; Jo et al., 2013; 2014)을 이용하여 측정하였다. 즉, 112개체의 줄기 원판을 그라잉 처리한 후, 원판의 4개 직각 방향에서 연간 직경 생장률을 각각 측정하고, 수령 5년 간격으로 평균치를 산출하였다. 산수유와 주목의 경우는 근원부에서 채취한 줄기 원판을 이용하여 상기한 방법으로 분석하였다. 지하부/지상부 생체량비는 대상 수목의 굴취를 통해 측정된 지하부 및 지상부 생체량 원자료(Jo and Ahn, 2012; Jo et al., 2013; 2014)에 근거하여, 역시 수령 5년 간격으로 분석하였다. 그리고, 이들 결과는 국내 산림수목(Chung et al., 1983; Park, 1987; KFRI, 2012; 2014) 및 국외 도시 조경수목(Jo, 1993)의 경우와 비교하였다.

3. 수령에 따른 탄소흡수량 분석

연구대상 수목의 흉고직경(산수유와 주목은 근원직경) 측정과 수령 분석에 근거하여 수종별 수령을 용이하게 추정하는 회귀모델을 유도하였다. 즉, 직경을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여, 수종별 직경 생장에 따른 수령을 추정하는 가장 적합한 회귀식을 최종 도출하였다. 직경 생장에 따른 탄소흡수 계량모델(Jo and Ahn, 2012; Jo et al., 2013; 2014)과 수령 추정 회귀모델을 적용하여, 각 수종의 직경별 해당 수령의 탄소흡수량을 산정하였다. 그리고, 수종별로 25년 동안 성장하면서 흡수하는 누적탄소량을 산출하여 수종 간 그 성능을 비교 분석하였다.

4. 식재 및 관리방안 모색

수종 간 동일 수령의 탄소흡수능에 근거하여 탄소흡수량 증진을 위해 상대적으로 적합한 식재수종을 제시하였다. 그리고, 전력소비에 따른 인구 1인당 탄소배출(IEA, 2014; <https://www.gir.go.kr>)을 상쇄할 식재밀도 요건과 바람직한 식재기법을 제안하였다. 최적 수종이라도 성장 불량은 탄소흡수능을 제한하므로, 본 연구결과와 기존 연구(Jo et al., 1998; Jo, 1999; Jo and Park, 2016)를 토대로 수목의 정상 성장을 도모할 식재 및 관리방안을 모색하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수령별 생장률 변화

연구대상 조경수종의 수령에 따른 줄기의 연간 직경 생장률은 수령 5년까지의 유행시기에 상대적으로 저조하다가, 그 이후 20년까지 현저히 증가하는 경향을 보였다(Table 2 참조). 즉, 수령 5년까지의 연간 흉고직경 생장률은 전체 수종 평균 0.56cm/년이고, 수령 6~10년의 경우, 약 1.5배 큰 0.83cm/년이었다. 미국 시카고의 단풍나무류, 느릅나무류, 벚나무류, 목련류, 아그배나무류, 가문비나무류 등 도시 조경수(Jo, 1993)나 국내 중부지방의 참나무류, 자작나무, 층층나무, 느릅나무, 소나무, 잣나무 등 산림수목(Chung et al., 1983; Park, 1987; KFRI, 2012)의 경우는 Table 2와 같이 유행시기부터 성목에 못지 않은 생장률을 보였다. 이는 성장 초기의 이식 및 활착과정에서 발생할 수 있는 수목 스트레스를 최소화할 식재와 관리가 필요함을 시사한다. 한편, 연구대상 수종의 연간 직경 생장률은 20년을 지나면서 다시 약간 감소하였는데, 이러한 경향은 상기한 국외 낙엽 조경수와 국내 산림수목의 경우도 유사하였다.

수목의 연간 생장률 및 생체량 변화는 연간 탄소흡수량의 다소를 좌우한다. 연구대상 낙엽수 및 상록수의 수령 30년에 걸친 연간 흉고직경 생장률은 각각 0.72cm/년, 0.83cm/년으로서,

Table 2. Changes in annual growth rate of stem diameter (cm) by tree species and age class

Tree species		Age class							
		1~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30	Mean	
Landscape trees studied	Deciduous	<i>Acer palmatum</i>	0.42	0.59	0.63	0.89	-	-	0.63
		<i>Chionanthus retusus</i>	0.46	0.60	0.55	0.62	-	-	0.54
		<i>Cornus officinalis</i>	0.57	0.68	0.84	0.98	-	-	0.69
		<i>Ginkgo biloba</i>	0.50	0.77	0.92	0.78	0.78	0.74	0.73
		<i>Prunus armeniaca</i>	0.39	0.60	0.63	0.65	0.43	-	0.55
		<i>Prunus yedoensis</i>	0.65	0.98	1.24	0.97	-	-	0.89
		<i>Zelkova serrata</i>	0.65	1.08	1.26	1.16	1.17	-	1.00
		Mean ^a	0.52	0.77	0.82	0.87	0.71	0.74	0.72
	Evergreen	<i>Abies holophylla</i>	0.47	0.68	0.95	0.80	-	-	0.70
		<i>Pinus densiflora</i>	0.68	1.02	0.84	0.82	0.72	0.67	0.82
		<i>Pinus koraiensis</i>	0.74	1.11	0.98	0.91	0.95	-	0.93
		<i>Taxus cuspidata</i>	0.27	0.42	0.49	0.52	0.47	0.39	0.42
		Mean ^a	0.65	0.96	0.94	0.86	0.86	0.67	0.83
	Grand mean		0.56	0.83	0.86	0.87	0.83	0.70	0.76
Foreign urban trees ^b	Deciduous	1.06	1.14	0.96	0.96	0.75	0.72	0.93	
	Evergreen	0.98	0.79	0.68	0.76	0.85	1.06	0.85	
Domestic forest trees ^c	Deciduous	0.67	0.67	0.53	0.52	0.49	0.49	0.56	
	Evergreen	0.56	0.54	0.63	0.60	0.58	0.54	0.57	

^a: *C. officinalis* and *T. cuspidata* excluded

^b: Deciduous species averaged across *Acer* spp., *Fraxinus* spp., *Malus* spp., *Magnolia* spp., *Prunus* spp., *Tilia* spp. and *Ulmus* spp., and evergreen species averaged across *Picea* spp. (Jo, 1993)

^c: Deciduous species averaged across *Betula platyphylla*, *Cornus controversa*, *Fraxinus mandshurica*, *Quercus* spp., *Tilia amurensis* and *Ulmus davidiana* (Chung et al., 1983; KFRI, 2012), and evergreen species averaged across *Pinus densiflora* and *P. koraiensis* (Park, 1987; KFRI, 2012)

국의 도시 조경수의 평균치보다 작았으나, 국내 산림수목의 경우보다 낙엽수 약 1.3배, 상록수 1.5배 더 컸다. 연구대상 수목의 생장률이 소나무와 잣나무 등 동일 수종의 산림수목보다 양호한 이유는 입지환경의 차이도 작용하겠지만, 개방 생장에 따른 경합 감소, 관리에 따른 생장조건 개선 등에 기인하는 것으로 분석된다(Jo and McPherson, 1995; Jo and Cho, 1998; Jo and Ahn, 2001; Jo et al., 2014). 연구대상 수종 중 연간 직경 생장률이 가장 큰 수종은 느티나무, 잣나무 등인 반면, 가장 작은 수종은 주목이었다.

2. 수령별 지하부 생체량비

연구대상 수목의 수령별 지하부/지상부 생체량비는 수령 20년 이후에 상대적으로 약간 증가하였으나, 뚜렷한 경향없이 낙엽수 0.39~0.44, 상록수 0.21~0.27이었다(Table 3 참조). 수령 전체의 평균 지하부/지상부 생체량비는 낙엽수 0.40, 상록수 0.23인 것으로 나타났다. 즉, 상록수의 뿌리 생체량은 줄기, 가지 및 잎을 포함하는 지상부 생체량의 23%에 해당하고, 낙엽수의 경우는 이보다 약 1.7배 많았다. 국내 산림수목의 지하부/지상부 생체량비(KFRI, 2014)는 낙엽수 평균 0.34(자작나무

Table 3. Changes in ratio of below ground/above ground biomass by age class for study species

Tree species [*]	Age class					Mean
	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30	
Deciduous	0.40	0.39	0.41	0.41	0.44	0.40
Evergreen	0.22	0.22	0.21	0.27	0.23	0.23

^{*}: *Cornus officinalis* and *Taxus cuspidata* excluded

0.35, 백합나무 0.23, 상수리나무 0.31, 굴참나무 0.32, 신갈나무 0.39, 졸참나무 0.44), 상록수 평균 0.27(소나무 0.26, 잣나무 0.28)인 것으로 보고된다. 산림수목의 지하부/지상부 생체량비 역시 낙엽수가 상록수보다 높았다.

연구대상 낙엽수의 지하부/지상부 생체량비는 산림수목보다 평균적으로 높은 반면, 상록수의 경우는 산림수목보다 약간 낮았다. 주목의 지하부/지상부 생체량비는 평균 0.52로서 타 수종보다 훨씬 높았는데, 수령 26~30년에는 0.32로 감소하였다. 기존 문헌에 따르면(Whittaker, 1962; Bray, 1963; Whittaker and Marks, 1975; Hermann, 1977; Jo and McPherson, 1995; Cairns et al., 1997), 소형 관목의 지하부 생체량은 대체로 지상부 생체량의 약 100%, 수고 3m 또는 근원직경 5cm 이하인 소

형 교목의 경우는 50%, 그 이상 규격인 중·대형 교목의 경우는 25%인 것으로 분석된다. 즉, 수목의 지하부/지상부 생체량비는 수령 증가에 따라 감소하였다. 그러나 본 연구에 근거하면 그 생체량비는 수종과 입지환경에 따라 변이를 보이나, 수령과 반비례하는 것은 아니었다. 이러한 결과는 식재 조경수의 근골취 난이성에 기인하여 미진했던 수종 및 수령별 지하부 생체량의 변화를 이해하는데 유용하다.

3. 수령별 탄소흡수량 변화

Table 4와 5는 각각 수종별 직경 생장에 따른 수령 추정 회귀모델과 수령 변화를 제시한 것이다. 수종별 회귀모델은 모두 F 검정 결과, 통계적으로 유의하였고($p < 0.015$), r^2 는 최소 0.88 이상으로서 적합도가 높았다. Y 절편 및 직경의 회귀계수도 t 검정 결과, 모두 1% 수준에서 유의성을 보였다. 연구대상 낙엽수 및 상록수의 수령은 흉고직경 5cm 생장함에 따라 평균적으로 약 6년씩 증가하였고, 20cm인 경우, 각각 27년생 및 24년생에 해당하였다.

Table 4. Regression coefficients to estimate tree age (Y) from stem diameter (X) by study species in the form $\ln Y = a + b \ln X$

Tree species	a	b	r^2	p
<i>Abies holophylla</i>	0.7744	0.7994	0.89	0.0120
<i>Acer palmatum</i>	1.2356	0.6672	0.93	0.0001
<i>Chionanthus retusus</i>	0.9776	0.8425	0.95	0.0001
<i>Cornus officinalis</i>	0.9683	0.7556	0.94	0.0001
<i>Ginkgo biloba</i>	0.9740	0.7179	0.96	0.0001
<i>Pinus densiflora</i>	0.4494	0.8898	0.98	0.0001
<i>Pinus koraiensis</i>	0.7077	0.7633	0.92	0.0150
<i>Prunus armeniaca</i>	1.0011	0.776	0.88	0.0002
<i>Prunus yedoensis</i>	0.6309	0.7916	0.94	0.0001
<i>Taxus cuspidata</i>	1.5662	0.6465	0.90	0.0001
<i>Zelkova serrata</i>	0.7904	0.7084	0.90	0.0001
Deciduous spp.	0.9735	0.7794	0.89	0.0001
Evergreen spp.	0.5582	0.8784	0.95	0.0001

Table 5. Changes in tree age by dbh for study species

Tree species	Dbh (cm)					
	5	10	15	20	25	30
Deciduous	9	16	22	27	33	38
Evergreen	7	13	19	24	30	35

수종별 직경 생장에 따른 해당 수령의 탄소흡수량을 산정한 결과(Table 6 참조), 수령 25년에 걸쳐 꾸준히 가장 많은 연간

탄소흡수량을 나타낸 수종은 느티나무, 왕벚나무, 소나무 등이었다. 단풍나무의 연간 탄소흡수량은 10년 이하의 유령시기에 상기 수종들과 함께 우위를 보였으나, 15년 이후부터는 상대적으로 중·하위 수종 그룹에 해당하였다. 잣나무의 연간 탄소흡수량은 단풍나무와 반대로 수령과 더불어 상승하는 경향이였다. 수령 20년의 연간 탄소흡수량은 느티나무 14.8kg/년, 왕벚나무 9.0kg/년, 잣나무 8.9kg/년, 소나무 5.4kg/년 등이었다. 산수유와 주목은 수령 전년에 걸쳐 연구대상 수종 중 가장 적은 연간 탄소흡수량을 보였다.

Table 6. Changes in annual carbon sequestration by tree species and age (kg/yr)

Tree species	Tree age				
	5	10	15	20	25
<i>Zelkova serrata</i>	0.5	2.6	7.2	14.8	25.9
<i>Prunus yedoensis</i>	0.4	1.9	4.7	9.0	14.8
<i>Pinus koraiensis</i>	0.2	1.2	3.8	8.9	17.0
<i>Pinus densiflora</i>	0.5	1.7	3.3	5.4	8.0
<i>Ginkgo biloba</i>	0.1	0.8	2.2	4.5	7.9
<i>Prunus armeniaca</i>	0.3	1.1	2.5	4.4	6.9
<i>Abies holophylla</i>	0.2	1.0	2.2	3.9	6.1
<i>Chionanthus retusus</i>	0.2	0.8	1.9	3.5	5.5
<i>Acer palmatum</i>	1.2	1.7	2.4	3.1	5.1
<i>Cornus officinalis</i>	0.1	0.6	1.6	2.9	4.7
<i>Taxus cuspidata</i>	0.0	0.1	0.2	0.5	1.0

수령 25년까지의 누적 탄소흡수량은 느티나무가 198.3kg으로 가장 많았고, 이어서 왕벚나무 121.7kg, 잣나무 117.5kg, 소나무 77.4kg, 은행나무 및 살구나무 60.0~61.0kg 등의 순이었다(Figure 1 참조). 산수유와 주목의 경우는 각각 39.6kg 및 6.8kg인 것으로 나타났다. 미국 도시의 낙엽 조경수는 수령 20년에 평균 14.7kg/년의 탄소를 흡수하였고, 25년 동안 흡수한 누적 탄소량은 196.3kg이었다(Jo, 1993). 국내 산림수목의 경우, 수령 20년에 낙엽수는 평균 3.8kg/년, 소나무와 잣나무 상록수는 2.9kg/년의 탄소를 흡수하였고, 25년 동안 흡수한 누적 탄소량은 낙엽수 53.6kg, 상록수 45.7kg이었다(Chung *et al.*, 1983; Park, 1987; KFRI, 2012; 2014). 여기에서, 국외의 낙엽 조경수는 단풍나무류, 느릅나무류, 벚나무류, 목련류, 아그배나무류 등을, 국내의 낙엽 산림수목은 참나무류, 자작나무, 층층나무, 느릅나무 등을 각각 포함한다. 본 연구대상의 느티나무는 국외 도시 조경수와 유사한 탄소흡수능을 보였고, 국내 산림수목보다 3.7~4.3배 많은 누적 탄소흡수량을 나타냈다. 산림수목의 누적 탄소흡수량은 본 연구의 수종 중 중·하위 그룹인 전나무나 이팝나무와 유사하였다.

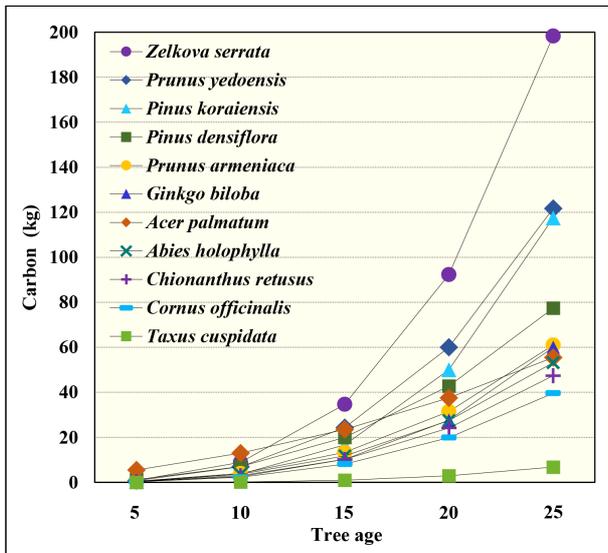


Figure 1. Changes in cumulative carbon sequestration by tree species and age

4. 식재 및 관리방안

탄소흡수능을 증진하기 위해 가장 적합한 조경식재 수종은 본 연구에 근거하면 느티나무이고, 이어서 왕벚나무, 잣나무, 소나무 등도 바람직하다. 탄소흡수능이 상대적으로 저조한 수종은 주목, 산수유, 이팝나무 등이다. 수종 선정에 부가하여 탄소흡수를 좌우하는 인자는 식재규격과 밀도이다. 도시의 제한된 식재공간 내에서 단위면적당 생체량 및 탄소흡수량을 증진하기 위해, 소형 수목의 저밀 분산 식재보다는 상대적으로 큰 규격의 수목을 경합이 문제되지 않는 한 밀도 높게 식재할 필요가 있다. 즉, 단층 단식 대신에 상기한 수종을 적절히 배합하는 다층 군식의 식재기법을 추구하여 수종 및 수령의 경관 다양성도 창출함이 바람직하다.

국내의 가정용 전력소비에 따른 1인당 연간 탄소배출량은 전력소비량 1,278kWh/년(IEA, 2014)과 탄소배출계수 0.128kg/kWh(<https://www.gir.go.kr>)를 적용하면 163.6kg/년이었다. 수령 25년생 느티나무의 누적 탄소흡수량은 동일 기간 전력소비에 따른 탄소배출량의 약 5%를 상쇄하는 역할을 담당한다. 즉, 25년간 가정용 전력소비에 따른 탄소배출량을 상쇄하려면 인구 1인당 약 20주의 느티나무를 식재해야 한다. 느티나무를 포함한 상기 추천 수종들의 수관 성장을 시뮬레이션한 결과, 수령 25년에 경합을 피할 식재밀도는 약 4주/100m²이었다. 따라서, 느티나무 20주 식재는 약 500m²의 면적을 요구하는 셈이다. 국토교통부의 조경기준에 따르면(<http://www.molit.go.kr/portal.do>), 주거 및 녹지지역의 식재밀도는 본 연구의 25년생에 해당하는 흉고직경 20cm 내외 교목의 경우, 5주/100m²이고, 상록수를 20% 이상 식재해야 한다. 이 식재밀도 기준은 본 연

구의 수관 시뮬레이션 밀도보다 약간 높다. 경관 다양성을 고려하여 잣나무 상록수 및 왕벚나무 각각 1주와 느티나무 2주를 배식하고, 하부 유희공간에 소형 주목 및 산수유를 각각 3~4주 다층 군식하면, 상기한 느티나무 단일 수종의 식재와 유사한 탄소흡수 효과를 달성할 수 있다. 상록수로서 소나무를 혼식하는 경우는 양수임을 감안하여, 경합 대상의 인접 수종보다 큰 수목을 식재하거나, 남측에 식재하여 수광조건을 확보한다(Jo and Park, 2016).

식재 수목의 성장상태가 불량하면 탄소흡수에 불리하므로, 양호한 성장지만 조성 후 적정 관리 등이 필요하다. 현장 수목굴취의 과정에서 파악한 뿌리 생체량은 수종, 규격, 토양조건 등에 따라 깊이 0.6~1m, 너비 1~2m 이내에 밀도 높게 집중 분포하였다. 주목할 사항은 뿌리가 수직적으로 깊게 보다는 수평적으로 넓게 분포하며, 세근은 통기성이나 배수성이 양호한 표토에 위치한다는 것이다. 따라서, 수목의 성장지반은 깊이보다 너비 확보가 더 중요하다. 예를 들어, 포장동선 상의 가로수 식재는 띠형으로 길게 확장된 투수성 식재대를 제공함으로써 뿌리의 수평적 성장을 도모할 수 있다. 식재 초기 이식 스트레스는 수목의 정상적 성장을 제한한다. 식재 수목은 최소한의 적기 관리를 실시하면, 대개 시공 3년 후 정상 활착되므로(Jo and Park, 2016), 그 이전에 건조 시 관수, 우드칩 멀칭이나 유기물 공급 등 관리가 바람직하다. 수목의 탄소흡수능을 현저히 저해하는 관리행위 중의 하나는 협소한 공간 내 식재, 가공선 보호 차원 등에 따른 과도한 전정으로서, 해마다 상당한 생체량이 반복 전정되는 것으로 나타났다(Jo *et al.*, 1998; Jo, 1999). 과도한 전정을 배제하기 위해, 가공선을 지하 매설하거나, 성장공간 규모를 고려한 수종 선정, 전문가 전정 참여 등의 방안이 요구된다.

IV. 결론

금세기 글로벌 정책이슈 중의 하나는 저탄소 사회의 구현이며, 이 현안은 미래 세대로 갈수록 더욱 부각될 가능성이 높다. 대기 탄소농도의 증가는 지속적인 화석연료 소비와 녹지면적 축소에 기인하므로, 적합한 조경식재를 통한 녹지 확충은 저탄소 구현에 필수적인 조경 업역이다. 그러나, 저탄소 조경식재 관련 실증적 연구와 현장 적용사례는 여전히 제한적인 상황이다. 수목의 수령별 성장률 및 생체량 변화는 연간 탄소흡수량의 다소를 좌우한다. 본 연구는 국내 중부지방의 주요 조경수종을 대상으로 근굴취를 포함한 직접수확법을 통해, 수령에 따른 직경 성장률, 지하부/지상부 생체량비 및 탄소흡수량의 변화를 구명하였다. 그리고, 본 연구와 관련 기존 문헌을 바탕으로 탄소흡수를 증진하기 위한 조경식재 및 관리방안을 모색하였다.

연구대상 수종의 수령 30년에 걸친 연간 흉고직경 생장율은 평균 0.76cm/년으로서, 국외 도시 조경수의 평균치보다 작았으나, 국내 산림수목의 경우보다 더 컸다. 수령 전체의 지하부/지상부 생체량비는 낙엽수 평균 0.40 및 상록수 0.23으로서, 낙엽수의 뿌리 생체량은 상록수보다 약 1.7배 많고, 산림수목의 경우보다 1.2배 많았다. 기존 연구에 따르면 수목의 지하부/지상부 생체량비는 수령 증가에 따라 감소하였다. 그러나, 그 생체량비는 수종과 입지환경에 따라 변이를 보이니, 수령과 반비례하는 것은 아니었다. 수령 25년까지의 누적 탄소흡수량은 느티나무가 198.3kg으로서 가장 많았고, 이어서 왕벚나무 121.7kg, 잣나무 117.5kg, 소나무 77.4kg 등의 순이었다. 연구대상 수종 중 산수유와 주목은 가장 적은 누적 탄소흡수량을 나타냈다. 본 연구의 느티나무는 국외 도시의 낙엽 조경수와 유사한 탄소흡수능을, 그리고 산림수목보다는 수종에 따라 3.7~4.3배 많은 누적 탄소흡수량을 보였다.

탄소흡수를 좌우하는 인자는 수종 선정과 더불어 식재규격과 밀도이다. 탄소흡수능의 증진 차원에서 가장 적합한 조경식재 수종은 본 연구 결과, 느티나무이고, 이어서 왕벚나무, 잣나무 등도 바람직하다. 도시의 제한된 식재공간 내에서 단위면적당 생체량 및 탄소흡수량을 증진하기 위해, 소형 수목의 저밀 분산 식재보다는 상대적으로 큰 규격의 수목을 밀도 높게 식재하는 다층 군식의 기법이 요구된다. 수령 25년생 느티나무의 누적 탄소흡수량은 동일 기간 가정용 전력소비에 따른 1인당 탄소배출량의 약 5%를 상회할 수 있다. 즉, 25년간 전력소비에 따른 탄소배출량을 상회하기 위해서는 1인당 약 20주의 느티나무를 4주/100m²의 밀도로 식재할 필요가 있다. 식재 수목의 생장상태가 불량하면 탄소흡수에 불리하므로, 양호한 생장지반 조성 및 식재 초기 이식 스트레스를 완화할 최소한의 관리가 병행되어야 한다. 현장 수목굴취의 과정에서 뿌리 생체량은 수직적으로 깊게 보다는 수평적으로 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 따라서, 수목의 생장지반은 깊이보다 표층의 너비 확보를 중시하여 뿌리의 수평적 성장을 도모함이 바람직하다.

연구대상 수목의 생장율과 탄소흡수능은 동일 수종의 산림수목보다 훨씬 양호하였다. 그 이유는 개방 생장에 따른 경합 감소, 관리에 따른 생장조건 개선 등에 기인하는 것으로 해석된다. 본 결과는 산림수목의 탄소흡수량을 도시 조경수에 적용하는 것은 상당한 오차를 야기할 수 있음을 입증한다. 연구대상 수목의 누적 탄소흡수량은 장령의 대형 수목이 부족하여 25년까지로 국한하여 산정하였다. 향후, 대형 수목을 포함하여 입지환경이 다른, 특히 남부지방의 조경수종을 대상으로 관련 연구가 수행될 필요가 있다. 본 연구는 수령에 따른 조경수의 생장율, 지하부 생체량 및 탄소흡수량의 변화를 구명하는 국내의 초석 연구로서 저탄소 도시녹지 조성에 유용하길 기대한다.

References

1. Bray, J. R.(1963) Root production and the estimation of net productivity. Canadian Journal of Botany 41: 65-71.
2. Cairns, M. A., S. Brown, E. H. Helmer and G. A. Baumgardner (1997) Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia 111: 1-11.
3. Cheong, W. D.(2016) Plan to Counteract Climate Change I. (http://opm.go.kr/pmo/news/news01.jsp?mode=view&article_no=92754)
4. Chung, S. H., M. G. Choi and G. S. Lee(1983) A study on the diameter increment of major hardwood in middle area of Korea. Journal of Korean Forest Society 60: 24-29.
5. Hermann, R. K.(1977) Growth and production of tree roots: A review. In J. K. Marshall, ed., The Belowground Ecosystem: A Synthesis of Plant-Associated Processes, Fort Collins, Colorado: Colorado State University, Range Science Department, pp. 7-28.
6. IEA(International Energy Agency)(2014) Electricity Information 2014. Paris.
7. Jo, H. K.(1993) Landscape Carbon Budgets and Planning Guidelines for Greenspaces in Urban Residential Lands. Ph. D. Dissertation, University of Arizona, Tucson, USA.
8. Jo, H. K.(1999) Energy consumption and carbon release from management of urban vegetation. Korean Journal of Environment and Ecology 13(2): 101-108.
9. 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.
10. Jo, H. K. and E. G. McPherson (1995) Carbon storage and flux in urban residential greenspace. Journal of Environmental Management 45: 109-133.
11. Jo, H. K. and H. M. Park(2016) Exploring planting strategies through monitoring of a greenspace established in the riparian zone - The case of an implementation site in Gyeonggi Province. Journal of Environmental Science International 25(12): 1689-1699.
12. 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.
13. 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.
14. Jo, H. K., K. E. Lee, Y. H. Yun, and O. H. Seo(1998) Land use and greenspace structure in several cities of Kangwon Province. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 25(4): 171-183.
15. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2000) Indicators of carbon storage and uptake by tree growth in natural ecosystem. Korean Journal of Environment and Ecology 14(3): 175-182.
16. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2001) Role of atmospheric purification by trees in urban ecosystem - In the case of Yongin. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 29(3): 38-45.
17. 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.
18. KFRI(Korea Forest Research Institute)(2010) Greenhouse Gas Inventory of Urban Green Areas - In Case of Seoul Metropolis, Research Report pp. 1-42.
19. KFRI(Korea Forest Research Institute)(2012) Volume, Biomass, and Stand Yield Table of Forest Trees, Research Report pp. 186-206.
20. KFRI(Korea Forest Research Institute)(2014) Carbon Emission Factors and Biomass Allometric Equations by Species in Korea, Research Report pp. 44-70.
21. Nowak, D. J.(1994) Atmospheric carbon dioxide reduction by

- Chicago's urban forest. In E. G. McPherson, D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, eds., Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. General Technical Report NE-186. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, pp. 83-94.
22. Nowak, D. J. and D. E. Crane(2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* 116: 381-389.
23. Park, W. G.(1987) A Study on the Diameter Growth and Key Year for *Pinus koraiensis* and *Pinus densiflora*. Master Thesis Dissertation. Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
24. Whittaker, R. H.(1962) Net production relations of shrubs in the Great Smoky Mountains. *Ecology* 43(3): 357-377.
25. Whittaker, R. H. and P. L. Marks(1975) Methods of assessing terrestrial productivity. In H. Lieth and R. H. Whittaker, eds., *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag, pp. 55-118.
26. <http://www.itreetools.org>
27. <http://www.law.go.kr>
28. <http://www.molit.go.kr/portal.do>
29. <https://www.gir.go.kr>

Received : 16 August, 2017

Revised : 20 October, 2017 (1st)

Accepted : 20 October, 2017

4인익명 심사필