

경기도 도시가로수의 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량 산정¹

박은진^{2*} · 강규이²

Estimation of C Storage and Annual CO₂ Uptake by Street Trees in Gyeonggi-do¹

Eun-Jin Park^{2*}, Kyu-Yi Kang²

요약

도시가로수의 탄소흡수원 기능을 평가하기 위하여 가로수로 흔히 식재되는 9개 수종을 선정하여 수종별 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하여 비교하였다. 수종별로 가로수 식재현황을 고려하여 대상지를 선정하고 흉고직경과 수령을 측정하였으며, 활엽수와 침엽수 상대생장식을 활용하여 가로수의 탄소저장량과 성장속도, 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하였다. 튜립나무, 메타세쿼이아, 양버즘나무가 빠른 성장속도를, 벚나무, 은행나무, 느티나무, 회화나무, 단풍나무는 중간의 성장속도를, 소나무는 느린 성장속도를 가진 그룹으로 분류되었고, 속성수의 경우 전정관리와 환경요인의 영향을 크게 받는 것으로 평가되었다. 조사한 9개 대표수종의 1 그루당 평균 탄소저장량은 205kgC/tree로, 수종에 따라 최대 518kgC/tree(튜립나무)에서 최소 41kgC/tree(소나무)를 나타냈다. 또한, 수종별로 성장 전년에 걸쳐 수목 1 그루가 흡수한 이산화탄소량은 연간 평균 7.6~99.1kgCO₂/tree/y 의 범위로, 튜립나무의 흡수량이 가장 높고 메타세쿼이아, 양버즘나무의 순이었으며, 소나무가 가장 낮았다. 대표수종의 연간 이산화탄소 흡수량을 기초로 추정된 경기도 전체 도시 가로수의 연간 이산화탄소 흡수량은 경기도의 산림이 흡수하는 이산화탄소량의 약 0.67% 정도로 매우 작은 것으로 평가되었다. 그러나, 경기도에서는 매년 산림이 감소하고 시가화면적이 확대되고 있어 도심 내 탄소흡수원 확대는 점점 중요해질 것으로 보이며, 도심 내에서 수목은 열섬현상을 완화시키고 건물 냉난방에너지를 절감시킴으로써 간접적으로 이산화탄소 배출을 감소시키는 기능 또한 매우 중요한 의미를 가지고 있어 보다 다기능적인 관리가 이루어질 필요가 있다.

주요어: 탄소흡수원, 흉고직경, 성장속도, 바이오매스

ABSTRACT

We estimated and compared C storages and annual CO₂ uptakes by 9 dominant tree species planted along the streets. DBH and age by tree species were measured in the sites selected considering the planting status and distributions of tree species, and biomass, C storage, growth rate, and annual CO₂ uptake were estimated for each species. As a result, *L. tulipifera*, *M. glyptostroboides*, *P. occidentalis* were classified into fast-growing group, *P. serrulata*, *G. biloba*, *Z. serrata*, *S. japonica*, *A. palmatum* showed intermediate growth rates, and *P. densiflora* was slow-growing. Average C storage per tree was 205kgC/tree and ranged from 518kgC/tree(*L. tulipifera*) to 41kgC/tree(*P. densiflora*). Average annual CO₂ uptake by urban street trees over their lifespan ranged from 7.6kgCO₂/tree/y to 99.1kgCO₂/tree/y and *L. tulipifera* was the greatest, followed by *M.*

1 접수 2010년 6월 30일, 수정(1차: 2010년 9월 13일, 2차: 2010년 10월 22일), 게재확정 2010년 10월 23일

Received 30 June 2010; Revised(1st: 13 September 2010, 2nd: 22 October 2010); Accepted 23 October 2010

2 경기개발연구원 환경정책연구부 Dept. of Environmental Policy, Gyeonggi Research Institute, 179 Pajang-dong, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do(440-290), Korea

* 교신저자 Corresponding author(parkej@gri.re.kr)

glyptostroboides and *P. occidentalis*, and *P. densiflora* was the lowest. Total annual CO₂ uptake by all street trees in Gyeonggi-do, estimated based on the annual CO₂ uptake by each species, was as small as approximately 0.67% of that by forest in Gyeonggi-do. However, urban trees are still important because forest area continues to decrease and urbanization occurs annually in Gyeonggi-do, and should be managed considering their multi-functional aspects, including mitigation of heat island effect and building energy saving(indirect CO₂ uptake).

KEY WORDS: CARBON SEQUESTRATION, DBH(diameter at breast height), GROWTH RATE, BIOMASS

서론

건물과 도로의 불투수면이 지배적인 경관을 구성하는 도심지에서 가로수와 도시숲은 도시 미관을 아름답게 하여 심미적 안정감을 주고, 대기오염물질과 이산화탄소를 흡수하며, 작은 동식물의 서식처로서 도시생태계의 중요한 요소가 된다. 기후변화와 지구온난화의 우려와 함께 도심에서 에너지사용과 이산화탄소 발생을 저감시키고 탄소흡수원을 증진시키기 위한 노력이 중요한 정책으로 받아들여지면서 도시 수목과 녹지의 기후변화 대응 관련 기능이 더욱 강조되고 있다.

Nowak and Crane(2002)은 뉴욕의 도시수목들이 총 120만톤의 탄소를 저장하고 있고 연간 77만톤의 이산화탄소를 흡수하며, 미국 도시 전체적으로는 연간 8,360만톤의 이산화탄소를 흡수하는 것으로 보고하였다. LA와 뉴욕의 백만 그루 수목식재 사업을 검토해보면, 도시수목 1그루는 LA의 경우 연간 평균 29kgCO₂, 뉴욕의 경우 8.9~36kgCO₂를 직접 흡수하는 것으로 추정된다(McPherson *et al.*, 2007; Moore, 2009). McHale *et al.*(2007)은 콜로라도 주의 4개 도시지역에서 도시수목의 성장에 따른 직접적인 이산화탄소 흡수량은 수목 1그루당 연간 75~100kgCO₂이고, 수목이 건물에 그늘을 형성하여 건물 냉방에너지를 절감시킴으로써 간접적으로 이산화탄소 발생을 억제시킨 효과까지 포함할 경우 150~225kgCO₂로서 2배 이상으로 증가한다고 보고하였다.

US Forest Service에 있는 도시림연구센터(CUFR; Center for Urban Forest Research)는 6개 지역에서 26종의 대표적인 도시가로수 900개체를 조사하여 각 수종별로 흉고직경과 수고로부터 수목의 바이오매스를 추정하는 성장식을 유도하고, 도시수목의 직접적인 이산화탄소 흡수량과 건물 냉방에너지 절감에 의한 간접적인 이산화탄소 발생 저감량을 산정할 수 있는 프로그램을 개발하여 누구나 수목의 위치정보와 흉고직경 및 수고를 입력하여 이산화탄소 흡수효과를 산정할 수 있도록 제공하고 있다(<http://www.fs.fed.us/>

ccrc/topics/urban-forests/).

국내에서는 산림부문의 탄소흡수기능에 초점을 맞추어 연구가 진행되었는데 임목축적량 변화로부터 탄소흡수량을 추정하고 있으며, 11개의 대표적인 산림 수종에 대하여 영급별 줄기밀도와 바이오매스 확장계수를 추정하여 구분하고 있다(Lee *et al.*, 2006). 도시수목의 경우는 수종별로 상대생장식을 적용하여 수목 개체당의 바이오매스와 이산화탄소 흡수량을 추정하는데 국내에서는 도시수목의 수종별 상대생장식과 이산화탄소 흡수량 방정식에 대한 연구가 많이 이루어지지 않았다. Jo(1999)가 소나무, 잣나무, 참나무류 및 현사시나무 등 4종의 교목과 진달래, 철쭉, 싸리 등 5종의 관목 총 277개체를 별목하여 수종별 상대생장식을 구하였다. Jo and Jo(1998)는 은행나무, 플라타너스, 느티나무, 단풍나무에 대해 적외선가스분석기를 사용하여 계절별로 잎의 CO₂ 흡수량과 가지의 CO₂ 호흡량을 측정하고, 전정에 의한 탄소상실을 고려하여 연간 순이산화탄소 흡수량 방정식을 제시하였다. 또한, Lee(2003)는 국내외에서 발표된 기존 식들을 모두 종합하여 교목활엽수, 교목침엽수, 관목침엽수, 관목활엽수로 단순화시켜 상대생장식 계수를 제시하였다.

한편, IPCC 4차보고서는 도시지역에서의 이산화탄소 흡수량을 산정하여 보고하도록 하고 있어 국내에서도 도시수목의 이산화탄소 흡수량에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있으며, 탄소중립도시와 같은 도시계획 수준에서 탄소저감 정책을 효율적으로 계획하고 실행하기 위해서도 도시수목과 녹지의 탄소저장량 및 흡수량에 대한 연구가 보다 다양하게 이루어질 필요가 있다.

본 연구는 도시의 탄소흡수원 확충을 위한 정책 마련의 기초자료를 제공하기 위해 경기도에서 가로수로 흔히 식재되는 대표적인 수종을 선정하여 수종별 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량을 산정 비교하고, 도시 가로수의 탄소흡수원으로서의 역할을 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 대표 수종 및 조사지 선정

1) 대표 수종 선정

가로수의 탄소저장량을 산정하기 위해 경기도 가로수 현황을 파악하여 9개 대표수종을 선정하였다. 경기도의 가로수(교목)는 2008년 말 기준 768,505주로 벚나무, 은행나무, 느티나무, 양버즘나무 등 18종의 수종과 기타 수종이 식재되어 있다(Table 1).

경기도의 가로수 교목 중에서 많이 식재되고 수형 및 성상이 대표성을 가지는 수종으로서 벚나무, 은행나무, 느티나무, 양버즘나무, 단풍나무, 회화나무, 메타세쿼이아, 툼립

나무, 소나무 등 9개 수종을 대표수종으로 선정하여 조사하였다(Table 2).

2) 조사 대상지 선정

경기도에서 전체 가로수 수종과 수종별 분수 및 위치에 대한 정보는 매년 파악되고 있으나 가로수 식재당시 식재연도와 수령을 기록한 자료가 없어 수종별로 상대적인 크기, 즉 흉고직경 분포만을 고려하여 조사지역을 선정하였다. Sung(2001)의 경기도 가로수 현황에 대한 연구를 기초로 하되 비교적 최근에 가로수가 식재된 신규 택지개발지를 포함하여 사전답사를 실시하고, 수원시, 성남시, 안산시, 안

Table 1. Major species and numbers of street trees in Gyeonggi-do

Common name	Korean name	Scientific name	No. of trees	Ratio(%)
Cherry	벚나무	<i>Prunus serrulata</i>	217,715	28.3
Ginkgo	은행나무	<i>Ginkgo biloba</i>	191,065	24.8
Zelkova	느티나무	<i>Zelkova serrata</i>	107,630	14.0
Platanus	양버즘나무	<i>Platanus occidentalis</i>	50,949	6.6
Retusa fringe tree	이팝나무	<i>Chionanthus retusa</i>	47,769	6.2
Maple	단풍나무	<i>Acer palmatum</i>	37,550	4.9
Japanese pagoda tree	회화나무	<i>Sophora japonica</i>	23,079	3.0
Metasequoia	메타세쿼이아	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	21,193	2.8
Apricot tree	살구나무	<i>Prunus armeniaca</i> var. <i>ansu</i> Max.	9,246	1.2
Japanese cornelian cherry	산수유	<i>Cornus officinalis</i>	8,540	1.1
Tulip tree	튤립나무	<i>Liriodendron tulipifera</i>	7,568	1.0
Threeflower maple	복자기	<i>Acer triflorum</i> Kom.	7,278	0.9
Buckeye	칠엽수	<i>Aesculus turbinata</i>	4,605	0.6
Pine tree	소나무	<i>Pinus densiflora</i>	4,602	0.6
Pin oak	대왕참나무	<i>Quercus palustris</i>	3,398	0.4
Cassia-bark tree	계수나무	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	3,238	0.4
Oriental hackberry	팽나무	<i>Celtis sinensis</i> Persoon	2,706	0.4
Goldenrain tree	모감주나무	<i>Koelreutena paniculata</i>	1,414	0.2
etc.	기타		19,960	2.6
Total			769,505	100.0

* Data in Dec. 2008 from Department of Environmental Policy, Gyeonggi-do

Table 2. Physiological features of major street tree species

Korean name	Scientific name	Physiological features		
		Type	Tree shape	Height(m)
벚나무	<i>Prunus serrulata</i>	Deciduous broad-leaved	Round	10~15
은행나무	<i>Ginkgo biloba</i>	Deciduous broad-leaved	Cone	15~30
느티나무	<i>Zelkova serrata</i>	Deciduous broad-leaved	Dome	20~30
양버즘나무	<i>Platanus occidentalis</i>	Deciduous broad-leaved	Oval	40
단풍나무	<i>Acer palmatum</i>	Deciduous broad-leaved	Round	10~20
회화나무	<i>Sophora japonica</i>	Deciduous broad-leaved	Round	15~25
메타세쿼이아	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	Deciduous broad-leaved	Cone	20~30
튤립나무	<i>Liriodendron tulipifera</i>	Deciduous broad-leaved	Oval	20~30
소나무	<i>Pinus densiflora</i>	Evergreen needle-leaved	Dome	20~35

양시, 과천시, 고양시 등에서 수종별로 흉고직경이 상대적으로 큰 곳, 중간인 곳, 작은 곳을 고르게 포함하도록 각각 9~12개 가로수 노선을 선정하여 총 90개 노선의 가로수를 조사하였다(Table 3, Figure 1).

대표수종별로 조사대상 노선 하나 당 3주씩 27~33주의 수목개체에 대해 수고(H)와 흉고직경(DBH)를 측정하였으

며, 그 중 4~5개 노선의 각 3주, 총 12~15주의 수목개체에 대해서는 수령을 함께 측정하였다. 수고는 디지털 측고기(Hypsometer (Haglof Vertex III))를 이용하여 측정하였으며, 흉고직경은 1.3m 높이에서 흉고직경 측정용 줄자를 이용하여 측정하였다. 가로수의 수령은 성장추를 이용하여 나이에 시료를 추출하고 분석하였다.

Table 3. Sampling sites and no. of sample trees for height(H), DBH, and age measurements

Street trees	*Sample sites (no. of sites)	No. of sites	No. of samples	
			DBH	Age
<i>Prunus serrulata</i>	SW(2), SN(1), GC(1), AS(6)	10	30	12
<i>Ginkgo biloba</i>	SW(2), SN(1), GC(2), AS(5), GY(2)	12	36	15
<i>Zelkova serrata</i>	SW(2), SN(2), GC(1), AS(4), GY(1)	10	30	15
<i>Platanus occidentalis</i>	SW(2), SN(1), GC(1), AY(1), AS(3), GY(1)	9	27	15
<i>Acer palmatum</i>	SW(1), SN(1), GC(2), AS(6)	10	30	12
<i>Sophora japonica</i>	SW(2), GC(1), AY(2), AS(3), GY(3)	11	33	15
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	SW(3), SN(2), AS(4)	9	27	15
<i>Liriodendron tulipifera</i>	SW(3), GC(1), AS(5)	9	27	12
<i>Pinus densiflora</i>	SW(2), SN(2), AS(6)	10	30	12
Total	SW(19), SN(10), GC(9), AY(3), AS(42), GY(7)	90	270	123

* SW: Suwon City, SN: Seongnam City, GC: Gwacheon City, AY: Anyang City, AS: Ansan City, GY: Goyang City

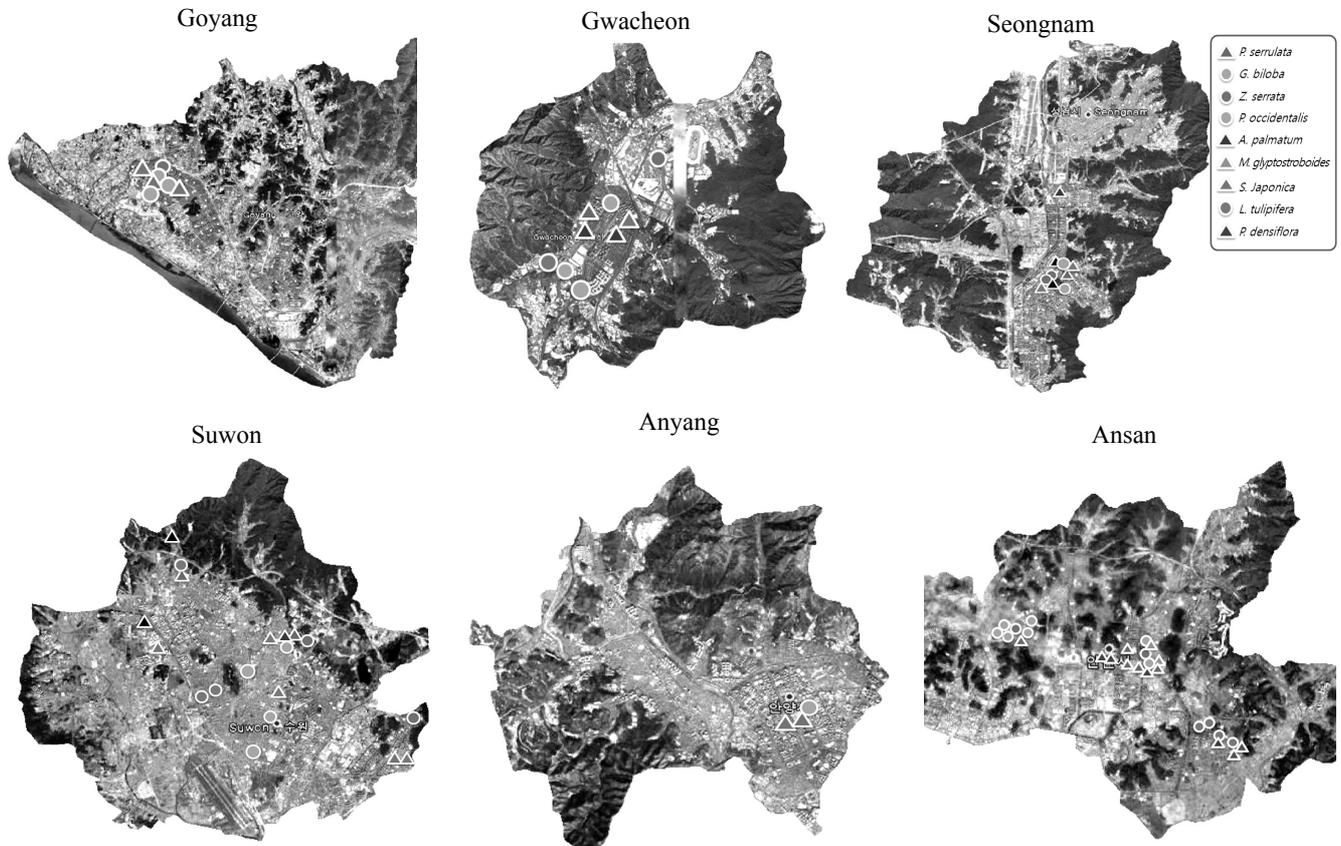


Figure 1. Sampling sites for urban street trees

2. 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량 산정

수목 한그루 당 탄소저장량은 일반적으로 수종별 바이오매스 상대생장식을 활용하여 산정하는데, 국내에서는 몇몇 도시수목 수종에 대해서만 상대생장식 계수가 알려져있다. Jo(1999)가 소나무, 잣나무, 신갈나무, 현사시나무, 철쭉, 진달래, 싸리나무 등에 대해 각각 상대생장식 계수를 밝힌 바 있고, Jo and Jo(1998), Jo and Ahn(2001)이 몇몇 도시 수종에 대해 적외선가스분석기에 의한 CO₂ 교환율을 측정하여 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하는 식을 유도한 바 있다. 기존 국내연구가 소나무와 참나무, 몇몇 관목류 등에 국한되어 본 연구에서 조사한 9개 수종들 각각에 맞는 상대생장식 계수를 적용할 수 없으므로 기존 식들을 종합 정리하여 활엽수와 침엽수로 구분하여 계수를 적용하는 Lee(2003)의 방법에 따라 탄소저장량을 산정하였다. 즉, 가로수 대표수종별 흉고직경을 측정한 후 활엽수와 침엽수를 구분하여 계수를 적용하는 (식1)의 상대생장식으로부터 바이오매스(W_i)를 산정하고, 탄소전환계수를 0.5로 하는 (식2)에 따라 탄소저장량(C_i)을 산정하였다.

$$W_i = a(DBH_i)^b \dots\dots\dots (식1)$$

- W_i: 가로수 대표수종 i의 평균 바이오매스(kg),
- a, b: 상대생장식 계수(a: 활엽수 0.1403, 침엽수 2.4595, b: 활엽수 0.1915, 침엽수 2.1436)
- DBH_i: 대표수종 i의 평균 흉고직경(cm)

$$C_i = CF \times W_i \dots\dots\dots (식2)$$

- Y_i: 가로수 대표수종 i의 평균 탄소저장량(kg)
- CF: 바이오매스에 대한 탄소 전환계수(0.5)

가로수 수종별 연간 이산화탄소 흡수량(U_i)은, 각 조사개체에 대해 산정된 탄소저장량을 수령으로 나누어 연간 평균 탄소축적량을 산정한 후 이를 다시 이산화탄소량으로 환산하여 추정하였다(식3).

$$U_i = \frac{1}{n} \sum (C/age) \times 44/12 \dots\dots\dots (식3)$$

- U_i: 가로수 대표수종 i의 연간 평균 이산화탄소 흡수량(kgCO₂/yr)
- C: 대표수종 i의 조사 개체목별 탄소저장량(kg)
- age: 대표수종 i의 조사 개체목별 수령(cm)

결과 및 고찰

1. 수고 및 흉고직경

경기도에서 대표적인 가로수 수종의 수고와 흉고직경을 측정한 결과는 Table 4와 Figure 2에서 보는 바와 같다. 평균 수고는 메타세쿼이아가 12.7m로 가장 크고 소나무가 6.1m로 가장 작았으며, 평균 흉고직경은 튜립나무가 가장 크고(35cm), 소나무가 가장 작았다(16.3cm). 수고와 흉고직

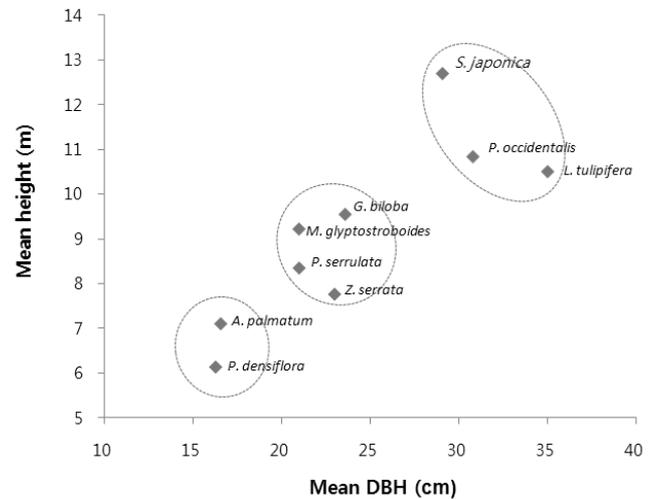


Figure 2. Mean height and DBH of street tree samples

Table 4. Height and DBH of sample street trees

Korean name	No. of samples	Height(m)			DBH(cm)		
		Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
<i>Prunus serrulata</i>	30	8.4	15.5	3.4	21.0	44.9	11.8
<i>Ginkgo biloba</i>	36	9.5	14.4	5.7	23.6	42.1	14.0
<i>Zelkova serrata</i>	30	7.8	13.0	5.0	23.0	47.1	14.3
<i>Platanus occidentalis</i>	27	10.8	15.0	7.7	30.8	45.5	20.7
<i>Acer palmatum</i>	30	7.1	11.4	3.3	16.6	31.4	8.6
<i>Sophora japonica</i>	27	12.7	18.5	6.6	29.1	37.8	24.2
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	33	9.2	13.3	5.5	21.0	38.5	13.7
<i>Liriodendron tulipifera</i>	27	10.5	13.2	4.6	35.0	51.0	20.9
<i>Pinus densiflora</i>	30	6.1	8.8	3.6	16.3	23.2	8.3

경의 크기에 따라 크게 세 개의 그룹으로 나누어졌는데 메타세쿼이아, 툼리나무, 양버즘나무는 수고와 흉고직경이 모두 큰 그룹(DBH 29~35cm)에, 벚나무, 은행나무, 느티나무, 회화나무는 중간 그룹(DBH 21~24cm)에, 단풍나무와 소나무는 작은 그룹(DBH 16-17cm)에 속하는 것으로 나누어졌다.

2. 수령과 성장속도

가로수 수종별로 수령을 측정하고 평균 15년~24년의 수령을 나타내었다(Table 5). 메타세쿼이아의 경우, 평균수령이 15.7년이고 최고수령 20년으로서 조사 수종 중 단풍나

Table 5. Age distributions of street tree samples

Street trees	No. of samples	Age(years)		
		Mean	Max	Min
<i>Prunus serrulata</i>	12	19.4	34.0	12.0
<i>Ginkgo biloba</i>	15	19.1	34.0	11.0
<i>Zelkova serrata</i>	15	18.4	32.0	13.0
<i>Platanus occidentalis</i>	15	24.1	42.0	13.0
<i>Acer palmatum</i>	12	15.3	22.0	9.0
<i>Sophora japonica</i>	15	15.7	20.0	11.0
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	15	16.3	28.0	11.0
<i>Liriodendron tulipifera</i>	12	19.2	35.0	11.0
<i>Pinus densiflora</i>	12	19.8	24.0	14.0

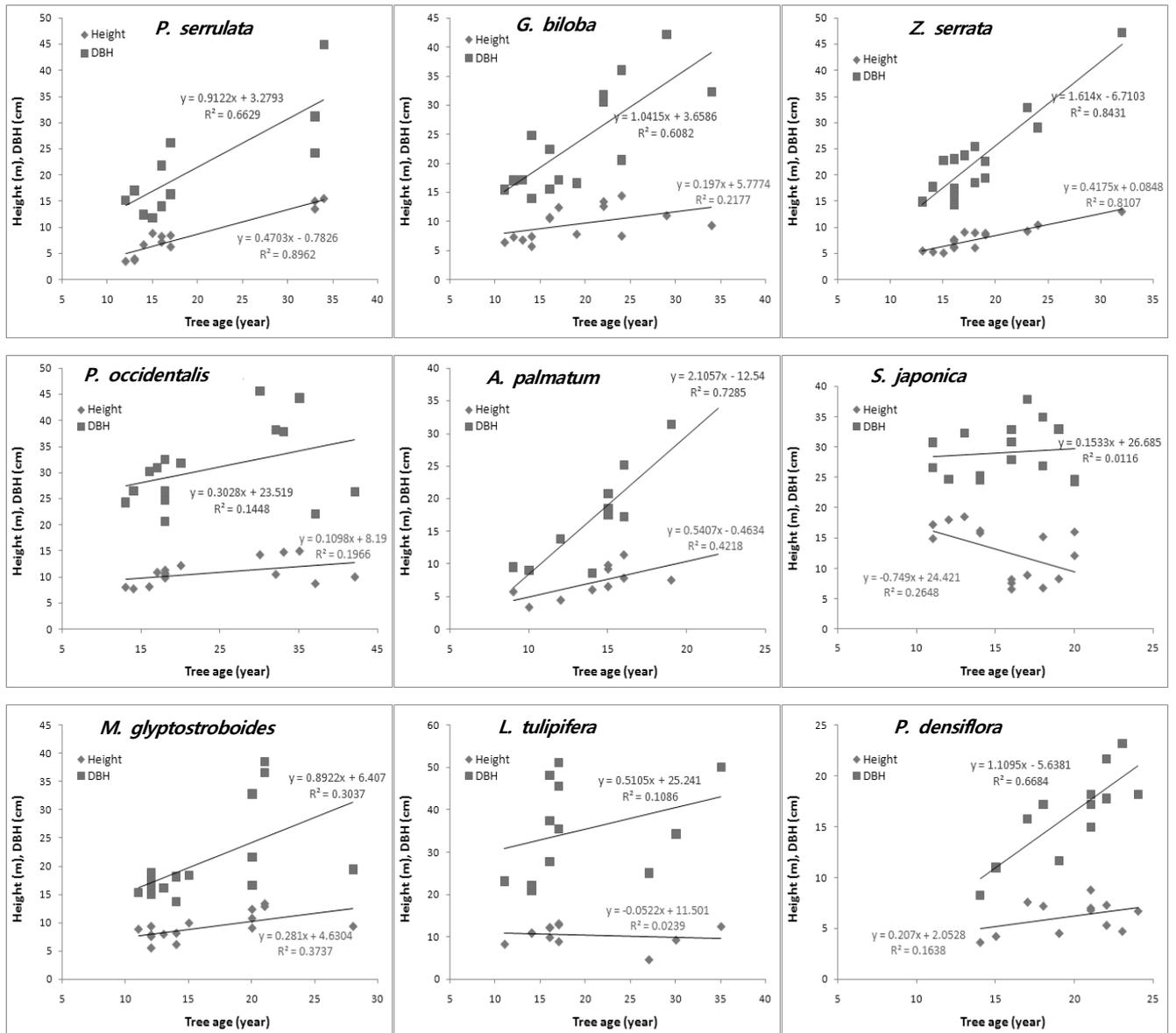


Figure 3. Height and DBH distributions by age of street tree samples

무를 제외하고 가장 어린 것으로 나타났고, 양버즘나무의 경우 평균수령 24.1년, 최고 42년 ~ 최소 13년으로 가장 오래된 것으로 조사되었다. 국내에서는 대부분 가로수 식재 시기와 식재당시의 수령 정보를 따로 기록하여 보관하지 않기 때문에 식재되어 있는 모든 가로수의 수령을 추정할 수 있는 방법은 없다. 도로의 개설시기와 식재와 관리를 담당하는 공무원들의 경험에 의해 유추될 수밖에 없는데 대부분 가로수 수종별 평균 수령은 본 연구에서 조사한 대로 20년 내외인 것으로 확인되었다. 경기도의 경우 신도시와 새로 개설된 도로가 많아 비교적 수령이 오래되지 않은 가로수가 많은 것으로 추정된다.

가로수 대표수종별로 조사 개체목의 수령에 따른 수고와 흉고직경의 분포는 Figure 3에서 보는 바와 같다. 수령의 증가에 따라 수고와 흉고직경이 증가하는 양상을 보여주었으나 수종별로 그 관계가 명확하지 않은 경우들도 나타났다. 벚나무, 단풍나무, 느티나무, 소나무, 은행나무 등은 수령 증가에 따른 흉고직경의 선형적 증가가 비교적 명확하게 나타났으나(R² 0.6 이상), 메타세쿼이아, 툼립나무, 양버즘나무의 경우 수령 증가에 따라 수고나 흉고직경이 증가하는 양상이 명확하게 나타나지 않았다.

이 두 그룹 간의 차이는 상대적인 수종들 간의 크기 차이와 일치한다. 즉, 수목의 크기가 작은 수종들의 경우 수령 증가에 따른 수고와 흉고직경의 변화가 명확한 반면, 수목의 크기가 큰 수종들은 수령과 수고 또는 흉고직경 간의 상관관계가 명확하지 않다고 할 수 있다. 이와 같은 조사결과는 몇 가지 요인과 관련되는 것으로 해석된다. 우선, 메타세쿼이아, 양버즘나무, 툼립나무 등과 같이 크기가 큰 수종은 상대적으로 속성수라고 할 수 있는데 속성수는 생장률이 큰 만큼 환경요인에 따른 생장률 변이가 크게 나타나 수령 증가에 따른 평균적인 생장량 변화를 넘기 때문으로 해석된다. 즉, 속성수 수종들은 햇빛, 토양과 같은 환경조건에 따라 생장속도가 크게 영향을 받는 반면, 벚나무, 느티나무, 단풍나무, 소나무 등은 환경조건에 따라 생장속도가 크게 변하

지 않고 수령에 따라 서서히 성장한 것으로 해석된다. 또 하나는 도심에 식재된 가로수는 주기적으로 전정과 같은 인위적인 관리를 받는데 크기가 큰 수목일수록, 수령이 오래된 수목일수록 전정관리를 더 많이 그리고 더 자주 받았기 때문으로 해석된다. 전정에 의해 사라진 바이오매스는 매년 수령증가와 함께 수고와 흉고직경 성장으로 반영되어야 할 부분이 반영되지 못한 것이라고 할 수 있다. 마지막으로 속성수인 만큼 생장이 초기에 일정기간 빠르게 진행되다가 차츰 둔화되면서 수령에 따른 차이를 크게 보이지 않았기 때문일 수 있다.

이와 같이 열악한 도심환경에 식재된 가로수의 특성상 수령과 수고, 흉고직경 간의 상관관계가 뚜렷하지 않은 경우가 있고, 결과적으로 Figure 3에서 보여준 것과 같은 회귀식을 활용하여 수고생장률과 흉고직경 생장률을 구하는 것은 불합리하다. 따라서, 각 조사 개체목의 수고와 흉고직경을 수령으로 나누어 생장 전년 동안의 수고생장률과 흉고직경 생장률을 산정하고 평균값을 구하였는데, 그 결과는 Table 6에서 보는 바와 같다.

도시가로수 대표수종의 수고생장률은 0.31~0.87m/y로서 메타세쿼이아가 가장 높고, 툼립나무(0.61m/y), 회화나무(0.58m/y), 은행나무(0.52m/y)의 순으로 나타났으며, 소나무가 0.31m/y로 가장 낮았다. 양버즘나무의 경우 다른 수종들에 비하여 전정관리를 집중적으로 받기 때문에 수고의 순생장률이 낮은 것으로 보인다. 흉고직경 생장률은 0.82~1.96cm/y로 나타났는데 툼립나무가 1.96cm/y로 가장 높고, 메타세쿼이아(1.92cm/y), 양버즘나무(1.41cm/y)의 순으로 조사되었다. Jo(1999)는 춘천시의 자연지에서 14년생 잣나무와 20년생 소나무의 흉고직경 생장률을 각각 0.75cm/y와 0.51cm/y로 조사하였고, Jung *et al.*(1983)은 국내 중부지방에서 40~65년생 활엽수의 흉고직경생장률을 0.68cm/y로 조사한 바 있다. 이와 같은 수치는 본 연구 결과에 비해 다소 낮는데 가로수 수목들은 밀식되어 있는 자연지 수목과 달리 상대적으로 빛과 수분에 대한 경쟁이 적고, 생장속도

Table 6. Height and DBH growth rates of street trees

Street trees	No. of samples	DBH growth rate (cm/y)			Height growth rate (m/y)		
		Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
<i>Prunus serrulata</i>	12	1.11	1.54	0.73	0.42	0.59	0.28
<i>Ginkgo biloba</i>	15	1.25	1.77	0.86	0.52	0.73	0.27
<i>Zelkova serrata</i>	15	1.23	1.52	0.89	0.42	0.53	0.33
<i>Platanus occidentalis</i>	15	1.41	1.89	0.60	0.50	0.64	0.24
<i>Acer palmatum</i>	12	1.09	1.65	0.50	0.47	0.71	0.28
<i>Sophora japonica</i>	15	1.92	2.79	1.21	0.87	1.56	0.38
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	15	1.31	1.83	0.69	0.58	0.80	0.33
<i>Liriodendron tulipifera</i>	12	1.96	3.00	0.93	0.61	0.79	0.17
<i>Pinus densiflora</i>	12	0.82	1.01	0.59	0.31	0.45	0.20

가 빠른 수종들이며, 수령이 더 어리기 때문에 해석된다.

3. 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량

1) 수종별 바이오매스와 탄소저장량

도시가로수 대표수종으로 선정한 9개 가로수 수종의 바이오매스와 탄소저장량을 산정한 결과는 Table 7에 보는 바와 같다. 평균수령 16년의 툼립나무 한 그루가 저장하고 있는 탄소량이 평균 518kgC/tree로 가장 높았고, 양버즘나무(평균수령 24년) 355kgC/tree, 메타세쿼이아(평균수령 16년) 290kgC/tree의 순이었으며, 소나무(평균수령 20년)가 41kgC/tree로 가장 낮았다.

2) 수종별 바이오매스 증가율과 연간 이산화탄소 흡수량

조사 수목의 수령은 최소 9년에서 최고 42년까지 분포하여 대체로 아직 생장기에 있다고 할 수 있다. 조사 수목의 바이오매스와 탄소저장량을 수령으로 나누어 생장 전년에 걸친 평균적인 바이오매스 증가율과 연간 이산화탄소 흡수량을 산정하였다(Table 8과 Figure 4).

본 연구에서 조사한 도시가로수 9개 수종의 연간 이산화

탄소 흡수량은 평균적으로 44kgCO₂/tree/y로 조사되었고 수종에 따라 7.6~99.1kgCO₂/tree/y의 큰 차이를 보였는데 툼립나무가 가장 높았고, 메타세쿼이아, 양버즘나무의 순이었다. 메타세쿼이아의 경우 양버즘나무보다 바이오매스와 탄소저장량은 낮으나 평균수령이 양버즘나무의 2/3 수준으로 낮아 그 만큼 짧은 기간에 더 많은 이산화탄소를 흡수한 것으로 볼 수 있다. 은행나무, 회화나무, 벚나무, 느티나무 등은 이산화탄소 흡수량에 있어 표준오차를 고려할 때 비슷한 범주에 있다고 할 수 있고, 단풍나무가 이보다 낮은 흡수량을 가지며, 소나무가 7.6kgCO₂/tree/y로 가장 낮아 툼립나무의 8%, 메타세쿼이아의 11% 정도 수준인 것으로 나타났다.

Jo and Jo(1998)가 적외선가스분석기를 사용하여 수목의 광합성과 호흡에 의한 CO₂ 교환율을 측정하고, 전정량을 고려하여 은행나무, 양버즘나무, 느티나무, 단풍나무의 연간 이산화탄소 순흡수량을 추정한 결과는 최대 19kgC/tree/y 였고, 전정량이 많았던 양버즘나무는 오히려 0.6kgC를 방출한 결과를 보고하여 본 연구결과에 비하여 상당히 낮았다. 그러나, 같은 방법으로 잣나무와 소나무에 대해 산정한 연간 이산화탄소 흡수량 연구(Jo and Ahn, 2001)는

Table 7. Biomass and C storages of street trees

Street trees	Age(years)			Biomass(kg/tree)			C storage(kgC/tree)		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
<i>Prunus serrulata</i>	19.4	34.0	12.0	342.8	1,624.6	60.7	171.4	812.3	30.4
<i>Ginkgo biloba</i>	19.1	34.0	11.0	414.8	1,386.7	92.5	207.4	693.3	46.2
<i>Zelkova serrata</i>	18.4	32.0	13.0	389.4	1,827.5	97.4	194.7	913.7	48.7
<i>Platanus occidentalis</i>	24.1	42.0	13.0	710.8	1,678.6	241.9	355.4	839.3	121.0
<i>Acer palmatum</i>	15.3	22.0	9.0	181.3	674.1	27.9	90.6	337.1	13.9
<i>Sophora japonica</i>	15.7	20.0	11.0	579.8	1,063.9	355.3	289.9	531.9	177.6
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	19.2	28.0	11.0	316.3	1,113.0	87.7	158.1	556.5	43.8
<i>Liriodendron tulipifera</i>	16.3	35.0	11.0	1,035.9	2,222.4	247.7	518.0	1,111.2	123.9
<i>Pinus densiflora</i>	19.8	24.0	14.0	81.6	161.9	17.9	40.8	80.9	8.9

Table 8. Rates of biomass increase and CO₂ uptake by street trees

Street trees	Biomass increase rate(kg/tree/y)		CO ₂ uptake rate(kgCO ₂ /tree/y)	
	Mean	Std. error	Mean	Std. error
<i>Prunus serrulata</i>	17.7	6.6	32.4	12.0
<i>Ginkgo biloba</i>	21.7	5.2	39.7	9.5
<i>Zelkova serrata</i>	21.2	6.1	38.8	11.2
<i>Platanus occidentalis</i>	29.5	4.8	54.1	8.8
<i>Acer palmatum</i>	11.8	3.5	21.7	6.5
<i>Sophora japonica</i>	37.0	3.6	67.8	6.6
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	19.4	5.3	35.5	9.8
<i>Liriodendron tulipifera</i>	54.0	11.3	99.1	20.8
<i>Pinus densiflora</i>	4.1	0.6	7.6	1.1
Average	24.0		44.1	

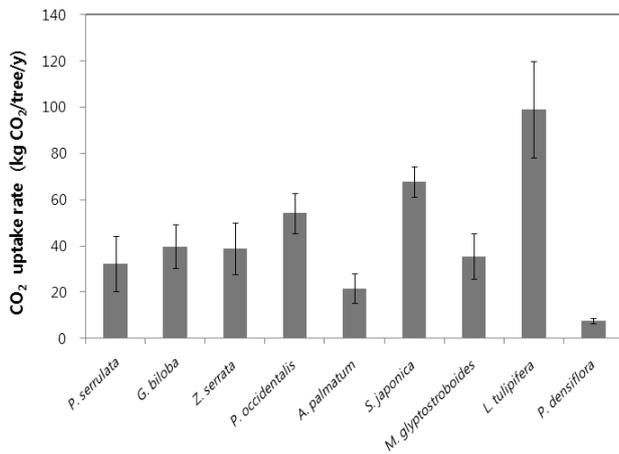


Figure 4. The rates of CO₂ uptake by street trees

소나무 28~31kgC/tree/y, 잣나무 19~50kgC/tree/y를 보고 하여 본 연구의 소나무에 대해 산정한 결과와 비교할 때 4배 정도 높았다. 본 연구에서 산정한 연간 이산화탄소 흡수량은 조사한 해당 연도의 광합성량과 호흡량에 기초한 이산화탄소 흡수량이 아니라 축적된 바이오매스 탄소를 수령으로 나누는 산정 방식에 기반하여 현재까지 수목의 전체 생장기간 동안 평균적인 연간 흡수량이기 때문에 이러한 차이를 보이는 것으로 해석된다.

3) 경기도 도시 가로수의 탄소저장량 및 이산화탄소 흡수량

경기도의 도시가로수로 가장 많이 식재되고 있는 9개 대표수종에 대한 탄소저장량과 연간 이산화탄소흡수량 산정 결과를 바탕으로 전체 도시가로수에 의한 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량을 추정하였다(Table 9). 경기도에 식재된 전체 가로수 중에서 9개의 대표수종이 86%를 차지하고 있고 나머지 기타수종이 14%를 차지하고 있다. 본 연구

에서 조사한 9개 수종에 대해서는 수종별로 산정한 수목 1그루 당 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량을 각각의 식재 본수에 곱하여 수종별 총 저장량과 흡수량을 산정하였고, 나머지 기타수종에 대해서는 거의 대부분이 활엽수이므로 소나무를 제외한 8개 수종의 수목 1그루 당 평균 저장량과 흡수량을 적용하여 추정하였다.

경기도에 식재된 가로수 769,505그루(2009년 말 기준)에 의한 총탄소저장량은 160,155tC이고, 연간 총 이산화탄소 흡수량은 30,693tCO₂/y로 추정되었다. 이와 같은 수치는 산림에 의한 탄소저장량과 이산화탄소 흡수량과 비교될 수 있는데, Koh *et al.*(2007)의 연구에 따르면 경기도 산림이 저장하고 있는 탄소량은 총 22.5Mt으로서 가로수는 산림 탄소량의 약 0.71%에 해당된다. 또한, Koh *et al.*(2007)의 연구에서 추정된 산림의 연간 이산화탄소 흡수량은 4.6MtCO₂/y로서 가로수는 산림의 연간 이산화탄소 흡수량과 비교할 때 약 0.67%에 해당된다. 이와 같은 총량의 단순 비교는 가로수의 탄소흡수원 기능이 산림에 비해 매우 미약한 것으로 평가될 수 있지만 이는 전체면적의 차이에서 오는 결과이며, 경기도에서 산림면적이 매년 약 0.3~0.4%씩 줄어들고 시가화면적이 확대되고 있기 때문에 도심 내에서 가로수를 포함한 수목식재 노력은 산림면적 감소의 영향을 상쇄시키는 데 매우 중요할 수 있다. 또한, 본 연구는 가로수의 직접적인 이산화탄소 흡수량만을 산정한 것으로 도심 내에서 수목은 그늘형성과 증발산작용으로 열섬현상을 완화시키고 건물 냉난방에너지를 절감시켜 간접적으로 이산화탄소 배출량을 감소시키는 기능을 가지고 있다. McHale *et al.*(2007)은 도심 내 수목의 간접적인 이산화탄소 흡수 효과는 직접적인 흡수량 이상이 된다고 보고하였다. 도심 내에서 가로수가 가지는 물순환기능, 오염물질 정화기능, 도심 경관이미지 형성 기능, 생물서식처 기능 등과 함께 탄소흡수원 기능을 복합적으로 고려하고 제고시킬 필요가 있다.

Table 9. Total C storage and annual CO₂ uptake by street trees in Gyeonggi-do

Street trees	No. of trees	C storage (tC)	Annual CO ₂ uptake (tCO ₂ /y)
<i>Prunus serrulata</i>	217,715	37,320	7,048
<i>Ginkgo biloba</i>	191,065	39,625	7,594
<i>Zelkova serrata</i>	107,630	20,954	4,176
<i>Platanus occidentalis</i>	50,949	18,108	2,759
<i>Acer palmatum</i>	37,550	3,403	814
<i>Sophora japonica</i>	21,193	6,144	1,438
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	23,079	3,650	819
<i>Liriodendron tulipifera</i>	7,568	3,920	750
<i>Pinus densiflora</i>	4,602	188	35
etc.	108,154	26,843	5,261
Total	769,505	160,155	30,693

4. 연구의 한계와 시사점

본 연구는 국내에서 산림에 비해 상대적으로 기존 연구가 적었던 도시가로수에 대해 수종별로 탄소저장량과 이산화탄소 흡수량 산정을 시도하고, 산림의 탄소량 및 이산화탄소 흡수량과 비교하였다는 데 의의가 있다. 그러나, 국내 도시가로수에 대해 수종별로 바이오매스 와 탄소저장량을 산정할 수 있는 상대생장식과 생장속도 등 생리생태적인 연구가 부족하여 본 연구에 적용한 산정방법에도 한계가 있다. 즉, 본 연구는 수종별 흉고직경과 수령을 실측하였으나 상대생장식은 활엽수와 침엽수로만 구분한 계수를 사용함으로써 수종별 바이오매스 추정에는 다소 한계점을 가진다.

또한, 시군별로 식재한 가로수의 식재위치, 수종, 본수 등의 자료는 잘 기록되어 관리되고 있으나 식재한 연도와 수령 정보는 기록되어 있지 않아 수종별로 상대적인 크기 비교를 통해서만 조사대상 가로수를 선정하였다. 즉, 경기도 가로수에 대한 선행연구(Sung, 2001)를 토대로 하여 수종별로 크기가 큰 수목과 중간, 작은 수목이 식재되어 있는 도로를 사전답사로 확인하여 선정하였으나 전체 가로수의 수종별 수령과 크기분포를 완전하게 반영한 것은 아니라는 점에서 한계가 있다.

위와 같은 한계로 인해 수종별 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량의 절대적인 수치는 어느 정도 오류를 포함한다고 할 수 있다. 향후 이러한 한계점을 극복할 수 있도록 도시가로수의 수종별 상대생장식 계수 추정 연구와 가로수 식재 시에 수령, 흉고직경, 식재연도 등의 자료 확보가 필요 하다.

감사의 글

본 연구의 수행에 많은 도움을 주신 서울대학교 생명과학부 식물생태학 연구실과 PGA 습지연구소의 한동욱 소장님께 깊이 감사드립니다.

인용문헌

Jo, H.K. and D.H. Jo(1998) Annual CO₂ uptake by urban popular

landscape tree species, J. of Kor. Institute of Landscape Architecture 26(2): 38-53.

Jo, H.K. and T.W. Ahn(2001) Role of atmospheric purification by trees in urban ecosystem - In the case of Yongin -. J. of Kor. Institute of Landscape Architecture. 29(3): 38-45.

Jo, H.K.(1999) Carbon uptake and emissions in urban landscape and the role of urban greenspace for several cities in Kangwon Province. J. of Kor. Institute of Landscape Architecture 27(1): 39-53.

Jung, S.H., M.K. Choi and K.S. Lee(1983) Study on DBH growth of major hardwood trees in the middle region of Korea. J. Korea Forest Society 60: 24-29.

Koh, J.K., Y.B. Park and W.S. Hwang(2007) Greenhouse gas emission inventory of the cities in Gyeonggi Province. Gyeonggi Research Institute.

Lee, G.G.(2003) Sustainability indicators of greenspace in apartment sites. Ph. D. thesis, The Graduate School Seoul National University.

Lee, K.H., Y.M. Son, J.H. Seo, R.H. Kim, I.H. Park, Y.H. Son and Y.J. Lee(2006) Establishing green house gas inventory system in forestry for responding UN Framework Convention on Climate Change. Rep. 06-20. Korea Forest Research Institute.

McHale, M., E.G. McPherson, and I.C. Burke(2007) The potential of urban tree plantings to be cost effective in carbon credit markets. Urban Forestry and Urban Greening 6: 49-60.

McPherson, E.G., J.R. Simpson, Q. Xiao and C. Wu(2007) Los Angeles One Million Tree Canopy Cover Assessment - Final Report : Pacific Southwest Research Station. USDA Forest Service. Albany, CA. 48pp.

Moore, J.(2009) Carbon Sequestration Potential of the Million Trees NYC Initiative. <http://snremitigation.wordpress.com/2009/04/22/carbon-sequestration-potential-of-the-million-treesnyc-initiative/>.

Nowak, D.J. and D.E. Crane(2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution 116: 381-389.

Sung, H.C.(2001) A Study for the present status of roadside tree in kyonggi-do, Gyeonggi Research Institute.

<http://www.fs.fed.us/ccrc/topics/urban-forests/>