

도시 낙엽성 조경수종의 탄소저장 및 흡수[†]

조현길* · 안태원**

*강원대학교 조경학과 · **(주)수프로 식물환경연구소

Carbon Storage and Uptake by Deciduous Tree Species for Urban Landscape

Jo, Hyun-Kil* · Ahn, Tae-Won*

*Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University

**Plant Environmental Research Station, Suppro Nursery Co., Ltd

ABSTRACT

This study generated regression models to estimate the carbon storage and uptake from the urban deciduous landscape trees through a direct harvesting method, and established essential information to quantify carbon reduction from urban greenspace. Tree species for the study included *Acer palmatum*, *Zelkova serrata*, *Prunus yedoensis*, and *Ginkgo biloba*, which are usually planted as urban landscape trees. Tree individuals for each species were sampled reflecting various diameter sizes at a given interval. The study measured biomass for each part including the roots of sample trees to compute the total carbon storage per tree. Annual carbon uptake per tree was quantified by analyzing radial growth rates of stem samples at breast height. The study then derived a regression model easily applicable in estimating carbon storage and uptake per tree for the 4 species by using diameter at breast height(dbh) as an independent variable. All the regression models showed high fitness with r^2 values of 0.94~0.99. Carbon storage and uptake per tree and their differences between diameter classes increased as the diameter sizes got larger. The carbon storage and uptake tended to be greatest with *Zelkova serrata* in the same diameter sizes, followed by *Prunus yedoensis* and *Ginkgo biloba* in order. A *Zelkova serrata* tree with 15cm in dbh stored about 54kg of carbon and annually sequestered 7 kg, based on a regression model for the species. The study has broken new grounds to overcome limitations of the past studies which substituted, due to a difficulty in direct cutting and root digging of urban landscape trees, coefficients from the forest trees such as biomass expansion factors, ratios of below ground/above ground biomass, and diameter growth rates. Study results can be useful as a tool or skill to evaluate carbon reduction by landscape trees in urban greenspace projects of the government.

Key Words: Direct Harvesting, Carbon Reduction, Regression Models, Biomass, Urban Greenspace

국문초록

본 연구는 직접수확법을 통해 도시 낙엽성 조경수의 탄소저장 및 흡수를 용이하게 추정하는 회귀모형을 제시하고

[†]: 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0009379).
Corresponding author: Hyun-Kil Jo, Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, Tel.: +82-31-250-8345, E-mail: jhk@kangwon.ac.kr

도시녹지의 탄소저감 계량화에 필요한 기반정보를 구축하였다. 연구대상 수종은 도시조경수로 흔히 식재되는 단풍나무, 느티나무, 왕벚나무 및 은행나무이었다. 수종별로 유목에서 성목에 이르는 일정 간격의 흉고직경 크기를 고려한 수목을 구입하여, 근굴취를 포함하는 직접수확법에 의해 개체당 부위별 및 전체 생체량을 산정하고 탄소저장량을 산출하였다. 또한, 흉고 부위의 수간 원판을 채취하여 직경생장을 분석하고 탄소흡수량을 산정하였다. 흉고직경을 독립변수로 4개 수종별 생장에 따른 단목의 탄소저장 및 흡수를 계량화하는 활용 용이한 회귀모델을 유도하였다. 이들 회귀식의 r^2 는 0.94~0.99로서 적합도가 상당히 높았다. 단목의 탄소저장량과 탄소흡수량은 모두 직경생장과 더불어 증가하였고, 직경급 간 그 차이도 대개 직경이 커질수록 증가하는 경향이였다. 동일 직경에서는 느티나무가 가장 높은 경향이였고, 다음으로 왕벚나무, 은행나무 등의 순이었다. 유도한 회귀식을 적용하면, 흉고직경 15cm인 느티나무 단목은 약 54kg의 탄소를 저장하고 있으며, 연간 7kg의 탄소를 흡수하는 것으로 나타났다. 본 연구는 도시 조경수목의 직접 벌목과 근굴취의 난이성에 기인하여 생체량 확장계수, 지하부/지상부 비율, 직경생장 등 산림수목의 계수를 대용한 기존 연구의 한계성을 극복할 새로운 초석을 마련하였다. 연구결과는 정부나 지자체의 도시녹지 사업과 관련하여 조경수목의 탄소저감을 평가하는 공공기반기술로서 유용하게 활용될 수 있다.

주제어: 직접수확, 탄소저감, 회귀모델, 생체량, 도시녹지

1. 서론

대기 CO₂ 농도 증가와 기후변화의 심각성으로 그 영향을 지연 혹은 완화하는 탄소흡수원으로서 도시녹지의 역할이 강조되고 있다. 도시녹지는 교토의정서(3.4조)에서 식생복구(vegetation) 활동으로 인정받으며, IPCC 2003 우수실행지침(Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry: GPG-LULUCF)과 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory: 2006GL)에서 정주지(settlements) 범주로서 독립적으로 다뤄짐에 따라 그 중요성이 더욱 부각되고 있다(국립산림과학원, 2010a). 우리나라를 비롯한 세계 각국의 중앙정부와 지방자치단체 수준의 탄소중립·상쇄 프로그램에서도 도시녹화를 주요 온실가스 감축활동의 하나로 다루고 있는 상황이다. 기후변화 대응을 위한 주요 정책 중 하나로서 도시 내 녹지확충 사업을 활발히 전개하고 있으며, 저탄소 녹색성장 정책에 부응하여 도시공원, 주택단지 등을 포함하는 도시공간의 조경식재 사업은 탄소흡수 및 저감에 초점을 두고 있다.

국외에서는 도시녹지에 대한 다양한 연구의 축적을 통해 도시별 녹지구조, 수종별 생체량 산정식, 연간 직경생장 등 도시수목의 탄소저장 및 흡수를 계량화하는 기반정보를 구축하고, 도시별 및 미국 전체 도시수목의 그 효과를 추정한 바 있다(Nowak and Crane, 2002). 또한, 도시수목의 탄소저감을 용이하게 계량화하는 프로그램을 개발하고(<http://www.fs.fedus/ccrc/topics/urban-forests>), 수목식재와 관련된 CO₂ 저장량의 계정 및 보고를 위한 지침을 제공하고 있다(<http://www.climateactionreserve.org/how/protocols>). 그러나, 국내에서는 도시 조경수목의 탄소

저감 효과를 계량화하기 위한 수종별 상대생장식이나 탄소흡수량 산정식에 관한 연구가 소수에 불과하며(조현길과 조동하, 1998; 조현길과 안태원, 2001; 국립산림과학원, 2010a; 박은진과 강규이, 2010), 주로 산림부문의 탄소흡수를 중심으로 관련 연구가 수행되어 왔다. 즉, 국립산림과학원(2010b)에서 11개 산림수종을 대상으로 목재기본밀도, 생체량 확장계수, 뿌리함량비, 탄소함량비 등 탄소흡수계수와 상대생장식을 도출한 바 있다. 도시수목은 자연산림과 환경조건이 상이한 도시환경에서 인위적 관리, 수목 간 경합조건의 차이 등으로 인해 생장에 의한 생체량 축적의 특성이 산림수목과 다르며, 일부 도시활엽수의 경우 탄소흡수량이 수종에 따라 산림수목의 1/2 수준에서 2배의 범위로 상당한 차이를 나타냈다(조현길과 조동하, 1998; 조현길, 1999). 또한, 국내 도시공원 수목의 개체당 탄소저장량은 미국 도시수목의 재적식을 적용한 산정치와 적지 않은 차이가 있는 것으로 분석되었다(국립산림과학원, 2010a).

도시 조경수목의 탄소저감 관련 소수의 기존 연구는 재적 측정에 의해 추정하거나(재적식법), 적외선가스분석기에 의한 CO₂ 교환을 측정을 통해 유도하는(CO₂ 교환을 측정법) 간접적인 방법을 적용하였다. 재적식법을 적용한 연구는 도시수목의 재적을 측정하였으나, 목재기본밀도, 생체량 확장계수, 지하부/지상부 비율 등 산림수목에서 유도된 각종 계수를 대체 적용하여 탄소저장량을 추정한 한계가 있다. CO₂ 교환을 측정법의 경우는 단위엽면적당 CO₂ 교환율, 관련 환경인자, 비동화기관의 호흡량, 직경크기에 따른 엽면적 등 여러 변수들의 장기적인 측정과 수식의 복잡한 유도과정을 요구한다. 탄소저장 및 흡수 산정의 오차를 줄일 수 있는 바람직한 방법의 하나는 직접수확이나, 식재수목의 벌목 및 근굴취 관련 난이성과 요구비용에 기인하여 이러한 직접수확법을 적용하여 탄소저장 및 흡수를

계량화한 국내 연구는 전무하며, 국외에서도 찾아보기 힘든 상황이다.

이와 같이, 국내 조경수목의 탄소저장 및 흡수를 계량화한 기반자료가 매우 미흡한 상황이며, 소수의 기존 연구도 간접적인 접근방법에 따른 한계점 보완과 그 결과의 비교 검증을 필요로 한다. 본 연구의 목적은 주요 낙엽성 도시조경수를 대상으로 직접수확법에 의해 개체당 탄소저장 및 흡수를 계량화하고, 수종별로 탄소저장량과 탄소흡수량을 용이하게 추정하는 수식을 개발하여 도시녹지의 탄소저감을 계량화하는데 필요한 기반정보를 구축하는 것이다. 본 연구결과는 조경수목의 수종별 생체량 확장계수, 지하부/지상부 비율, 직경생장 등 직접 벌목 및 근굴취의 난이성에 기인한 기존 연구의 한계점을 보완하고, 국내 도시녹지 탄소저감 계량화의 타당성과 신뢰성을 제고하는데 기여할 수 있다. 본 논문에서 탄소저장량은 수목이 생장하면서 여러 해에 걸쳐 축적한 총량을, 탄소흡수량은 수목이 한 해 동안 흡수한 양을 각각 의미한다.

II. 내용 및 방법

1. 수목굴취 및 생체량 측정

1) 수종 및 굴취수목 선정

국내 도시수목의 탄소저장 및 흡수(조현길과 조동하, 1998; 국립산림과학원, 2010a; 박은진과 강규이, 2010), 도시의 녹지구조나 조경수 식재분포(방광자와 이종석, 1995; 조현길 등 1998a; 1998b), 가로수 현황(<http://www.forest.go.kr>) 등 관련 선행연구 및 문헌자료를 검토하여, 중부지방에 흔히 식재되는 주요 향토낙엽수 4개 교목종을 연구대상 수종으로 선정하였다. 즉, 그 대상 수종은 단풍나무(*Acer palmatum*), 느티나무(*Zelkova serrata*), 왕벚나무(*Prunus yedoensis*) 및 은행나무(*Ginkgo biloba*)이었다.

중부지방에 분포하는 다수의 조경수 재배농장과 식재공간을 현장 답사하여, 수종별 약 10개체씩 연구목표 달성에 부합하는 개방 성장한 수목을 구입하였다. 즉, 수종별로 유목에서 성목에 이르는 일정간격의 흉고직경 크기를 고려하고, 해당 수종 고유의 수형을 유지하면서 수관 등이 정상적으로 성장한 개체를 굴취수목으로 선정하였다. 굴취수목의 결정은 수목개체 구입이나 측정과정에 소요되는 비용 및 시간과 표본개체수의 충분한 확보라는 대립적 양 측면을 가감 조정한 것이다.

2) 현장굴취 및 생체량 측정

구입한 수목은 낙엽 전인 8월 하순~10월 초순에 현장에서 직접 굴취하여 줄기, 가지, 잎, 뿌리로 구분한 부위별 생체량을 실측하였다. 굴취 시 흉고직경, 수관폭, 수고 등 각 개체의 크기

를 측정하고, 수종별 3개소씩 생장공간의 토양을 채취해 농업과학기술원(2000)의 토양분석방법에 따라 토양의 물리화학적 특성을 분석하였다. 현장굴취 및 생체량 측정은 국립산림과학원(2007)의 바이오매스 조사·분석 표준방법을 부분적으로 참조해 수행하였으며, 그 세부과정은 다음과 같다.

- 수목 크기 측정: 흉고직경은 지상 1.2m 높이에서 직경줄자로 0.1cm 단위까지, 수관폭은 직각방향으로 2회 0.1m 단위까지, 그리고 수고는 굴취 후 줄자로 0.1m 단위까지 측정하였다.
- 뿌리 굴취 및 생체량 측정: 백호우를 이용해 뿌리를 굴취하였고, 굴취 중 끊어진 뿌리도 모두 채취하였다. 기계톱을 이용해 지표면을 기준으로 뿌리를 분리한 후, 고압분사기로 흙을 모두 제거하였다. 그리고, 100g 단위까지 모든 뿌리의 생체량을 측정하였다.
- 줄기 생체량 측정: 기계톱 등을 이용해 줄기와 가지를 분리하되, 가지는 잔여부분이 남지 않도록 가지의 기부에서 절단하였다. 줄기의 생체량은 100g 단위까지 측정하였으며, 줄기와 가지의 구분은 유사 직경으로 분기되어 모호한 경우 다음 기준에 따라 판단하였다.
 - 분기 위치가 수관(잎 형성 부분 기준)보다 하부인 경우는 줄기로 취급하되, 직경이 상대적으로 현저히 작은 것은 가지로 취급하였다.
 - 분기 위치가 수관의 내부인 경우는 1차 분기에 한정해 줄기로 취급하고, 2차 분기부터는 가장 굵은 것 1개를 줄기로 선택하고, 그 외의 것은 모두 가지로 취급하였다.
- 가지 생체량 측정: 수작업으로 잎을 분리한 후, 적정 길이로 절단하여 100g 단위까지 모든 가지의 생체량을 측정하였다.
- 잎 생체량 측정: 가지에서 모든 잎을 분리하여 자루에 넣어 10g 단위까지 생체량을 측정하였다. 은행나무의 경우 열매도 구분하여 측정하였다.

3) 표본채취 및 건중량 산정

생체량 대비 건중량(이하 생체량으로 명명)을 산정하기 위하여 뿌리, 줄기, 가지, 잎 등 부위별로 생체량 환산용 표본을 채취하고, 현장에서 10g 단위까지 생체량을 측정하였다. 즉, 줄기는 2m 간격으로 두께 5~10cm의 원판을, 뿌리는 그루터기와 타 부위로 구분해 각각 1~7kg을, 가지는 해당 수목의 굵은 가지, 중간 가지 및 가는 가지의 구성비를 고려해 이들을 골고루 섞어 1~4kg을, 그리고 잎은 약 1kg을 채취하였다. 또한, 지상 1.2m의 흉고 부위에서 직경생장 분석용 줄기 원판을 채취하고, 즉시 이중 비닐백에 넣어 실험실로 운반하였다.

생체량 환산용 표본은 부패 방지를 위해 1차적으로 65℃ 대형 건조기에서 약 2주간 건조하였다. 1차 건조한 표본은 85℃

건조기에서 무게가 더 이상 감소되지 않는 항량이 될 때까지 완전히 건조시킨 후, 3kg용 전자저울로 1g 단위까지 생체량을 측정하였다. 부위별 표본의 생중량 대비 생체량의 비를 도출하고, 이를 해당 개체의 생중량에 적용하여 단목의 부위별 및 전체 생체량을 산출하였다.

2. 탄소저장량 회귀모델 개발

생체량 산정결과에 근거하여 수종별 생장에 따른 단목의 탄소저장량을 용이하게 추정하는 회귀모델을 유도하였다. 수목의 목질부 및 잎의 평균 탄소함량은 생체량의 약 50%이므로 (Ovington, 1956; Reichle *et al.*, 1973; Pingrey, 1976; Ajtay *et al.*, 1979; Chow and Rolfe, 1989; 송철영 등, 1997), 생체량에 0.5를 곱하여 탄소저장량으로 전환하였다. 탄소저장량 산정 회귀모델의 유도에 있어서는 흉고직경, 수고 등을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 회귀식과 변수를 최종 도출하였다.

3. 탄소흡수량 회귀모델 개발

굴취수목을 대상으로 지상 1.2m의 흉고 부위에서 상기한 바와 같이 줄기 원편을 채취하여 연간 직경생장률을 분석하고, 수령을 파악하였다. 직경생장률은 각 원편의 4개 직각 방향에서

분석한 생장률을 평균하여 산출하였다. 각 개체의 탄소흡수량은 직경생장 분석결과를 토대로 연간 증가된 생체량을 구하고, 이를 탄소량으로 전환하여 산정하였다. 즉, 연간 직경생장률을 이용하여 전년도의 직경을 구하고, 이 직경변수를 유도한 생체량 산정식(표 2 참조)에 대입하여 전년도의 생체량을 산정하였다. 현년도의 생체량에서 전년도의 생체량을 제감하여 생체량의 연간 증가량을 산출하였다. 이는 대부분 낙엽과 분해를 통해 해마다 탄소를 대기에 환원하므로 연간 증가된 생체량에서 제감하였다. 연간 증가된 생체량에 탄소함량비 0.5를 곱하여 탄소흡수량으로 전환하였다. 이상의 계량분석 결과에 근거하여 흉고직경, 수고 등을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여, 수종별 생장에 따른 단목의 탄소흡수량을 추정하는 가장 적합한 회귀식과 변수를 도출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수목 생체량 및 성장기반

연구대상 굴취수목은 여주(단풍나무), 이천(느티나무 및 왕벚나무), 양양(은행나무) 등에 분포하였고, 그림 1과 같이 가로변이나 조경수 농장 가장자리에서 독립목 형태로 넉넉한 수관 성장 공간을 확보해 개방 성장하는 것들이었다. 수종별 흉고직경은 표 1 및 그림 2와 같이 단풍나무 4.9~19.6cm, 느티나무



그림 1. 연구대상 수목의 생장 및 현장굴취 현황

표 1. 수종별 수목의 수령과 연간 흉고직경생장

수종	n	흉고직경(cm)	수령(년)	직경생장(cm/년)
단풍나무	11	4.9~19.6	9~21	0.64±0.04
느티나무	10	5.1~28.0	8~23	0.99±0.05
왕벚나무	10	4.8~23.0	8~21	0.91±0.03
은행나무	10	5.0~25.0	11~27	0.72±0.03

5.1~28.0cm, 왕벚나무 4.8~23.0cm, 은행나무 5.0~25.0cm 등의 범위였고, 수령은 최소 8~최대 27년생이었다. 생장기반인 토양의 물리화학적 특성은 표 2와 같다. 토성은 수종에 따라 사양토(단풍나무), 사질식양토(느티나무 및 은행나무), 식양토(왕벚나무) 등이었다. 화학성은 각각 pH 4.5~5.2, 유기물 1.0~2.7%, 전질소 0.04~0.09%, 유효인산 159.7~273.1mg/kg, 치환성 K⁺ 0.18~0.40cmol⁺/kg, 양이온치환용량 7.9~9.7cmol⁺/kg 등이었다. 조정설계기준(한국조경학회, 2007)에서 제시하는 토양의 항목별 평가등급에 준하면, 유효인산은 상·중급에, 양이온치환용량이 중급에, 이들을 제외한 대부분의 항목은 하급에 해당하였다.

굴취수목의 흉고직경 생장률은 느티나무가 평균 0.99cm/년로서 가장 컸고, 다음으로 왕벚나무 0.91cm/년, 은행나무 0.72cm/년, 단풍나무 0.64cm/년 등의 순이었다. 국내 산림지 활엽교목의 연간 흉고직경 생장률은 평균 0.67cm인 것으로 보고된다(정성호 등, 1983; 손영모 등, 1997; 조현길, 1999). 단풍나무와 은행나무의 직경생장률은 산림지 활엽교목의 경우와 유사한 수준이고, 왕벚나무와 느티나무의 경우는 약 1.5배 큰 것으로 분석되었다.

단목의 전체 생체량은 흉고직경에 따라 단풍나무가 5~133kg/주, 느티나무 9~545kg/주, 왕벚나무 5~219kg/주, 은행나무 5~226kg/주 등의 범위이었다(그림 3 참조). 부위별 생체량 점유비는 개체에 따라 다소 차이는 있으나, 은행나무를 제외한 3개 수종은 평균적으로 줄기가 41~44%로서 가장 높았고, 다음으로 뿌리 26~30%, 가지 21~26%, 잎 4~7% 등의 순이었다. 은행나무의 경우는 뿌리가 40%로서 줄기 36%보다 약간 높은 수준이었고, 가지와 잎(열매 포함)이 각각 18%, 6%를 점유하였다. 굴취수목의 생체량 분석결과를 토대로 유도한 생체량 산정식은 표 3에 제시하였다. 이들 회귀식은 모두 F 검정 결과

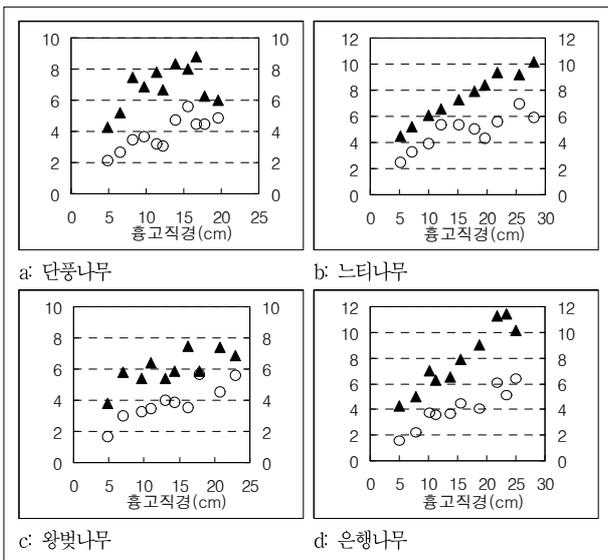


그림 2. 수종별 수목의 흉고직경에 따른 수고 및 수관폭 변화
범례: ▲ 수고, ○ 수관폭

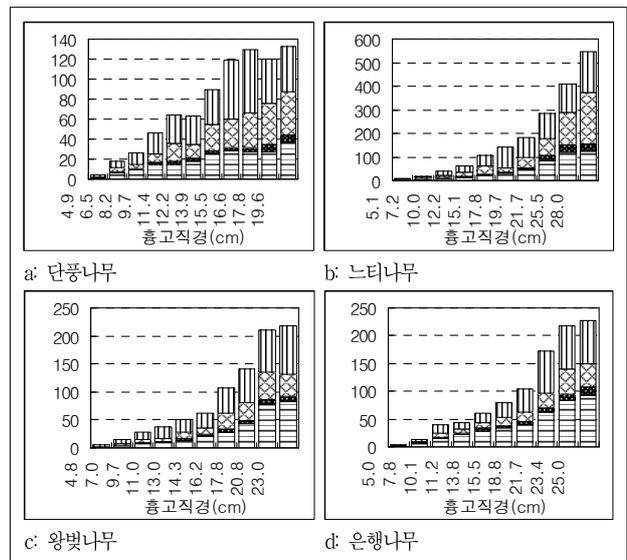


그림 3. 수종별 수목의 흉고직경에 따른 생체량 변화
범례: ▨ 줄기, ▩ 가지, ■ 잎/열매, ▤ 뿌리

표 2. 수종별 생장토양의 물리화학적 특성*

수종	토성	산도	유기물 (%)	전질소 (%)	유효인산 (mg/kg)	치환성 양이온(cmol ⁺ /kg)			양이온 치환용량 (cmol ⁺ /kg)
						K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
단풍나무	사양토	4.8(하)	1.0(하)	0.04(하)	267.0(상)	0.23(하)	1.19(하)	0.60(중)	7.9(중)
느티나무	사질식양토	5.5(중)	1.4(하)	0.04(하)	273.1(상)	0.40(하)	1.91(하)	0.76(중)	8.1(중)
왕벚나무	식양토	4.5(하)	2.7(하)	0.09(중)	159.7(중)	0.34(하)	0.83(하)	0.36(하)	9.7(중)
은행나무	사질식양토	5.2(하)	1.4(하)	0.04(하)	231.3(상)	0.18(하)	0.90(하)	0.99(중)	9.1(중)

* () : 조정설계기준(한국조경학회, 2007)의 토양 평가등급

표 3. 수종별 단목의 부위별 생체량 산정식

수종	회귀식*	r ²	p
단풍나무	Y=-46.4127+9.7076 D	0.9666	<0.0001
	lnYf=-4.5998+2.2322 lnD	0.9278	<0.0001
느티나무	lnY=-1.7777+2.3862 lnD	0.9951	<0.0001
	lnYf=-4.0932+2.2247 lnD	0.9287	<0.0001
왕벚나무	lnY=-2.1333+2.4181 lnD	0.9916	<0.0001
	lnYf=-5.0536+2.3686 lnD	0.9651	<0.0001
은행나무	lnY=-2.1497+2.3787 lnD	0.9855	<0.0001
	lnYf=-4.2846+2.1174 lnD	0.9379	<0.0001

* Y: 총 생체량(kg), Yf: 잎 생체량(kg), D: 흉고직경(cm)

통계적으로 유의하였고(p<0.0001), r²는 최소 0.92 이상으로서 적합도가 양호하였다. Y 절편 및 흉고직경의 회귀계수도 t 검정 결과 모두 1% 수준에서 유의한 것으로 분석되었다. 이상의 계량 분석 결과는 수종별 단목의 탄소저장 및 흡수 회귀모델, 생체량 확장계수, 지하부/지상부 비율 등을 도출하는데 이용하였다.

2. 탄소저장량 산정 회귀모델

굴취수목의 직경생장에 따른 탄소저장량 변화는 그림 4와 같으며, 표 4는 최종 도출한 수종별 단목의 탄소저장량 산정 회귀모델을 나타낸다. 4개 수종별 회귀식은 모두 F 검정 결과, 통계적으로 유의하였고(p<0.0001), r²는 최소 0.96 이상으로서 적합도가 상당히 높았다. Y 절편 및 흉고직경의 회귀계수도 t 검정 결과, 모두 1% 수준에서 유의성을 보였다. 한편, 독립변수로서 흉고직경뿐만 아니라, 수고, 수관폭 등을 포함하는 회귀식

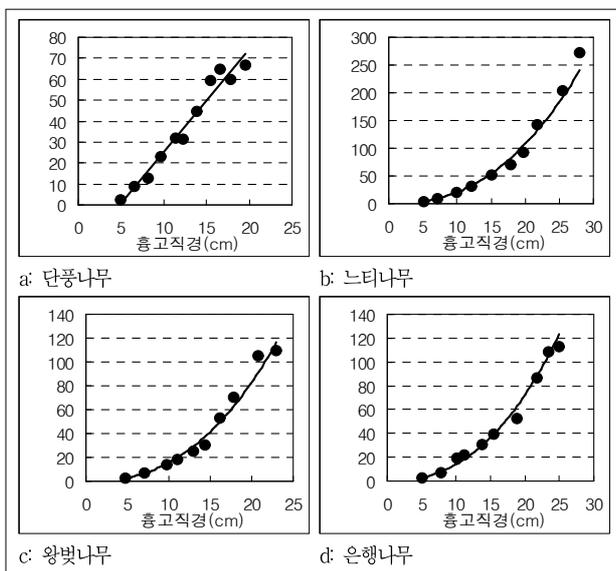


그림 4. 수종별 단목의 직경생장에 따른 탄소저장량 변화

표 4. 수종별 단목의 탄소저장량 산정 회귀모델

수종	회귀식*	r ²	p
단풍나무	Y=-23.2064+4.8538 D	0.9666	<0.0001
느티나무	lnY=-2.4708+2.3862 lnD	0.9951	<0.0001
왕벚나무	lnY=-2.8265+2.4181 lnD	0.9916	<0.0001
은행나무	lnY=-2.8428+2.3787 lnD	0.9855	<0.0001

* Y: 탄소저장량(kg), D: 흉고직경(cm)

을 유도한 결과, 유의한 F값과 양호한 설명력을 보였으나, 수고나 수관폭의 회귀계수가 5% 수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 탄소저장량을 산정하는 독립변수로서 흉고직경 외에 수고를 포함시킬 수도 있으나, 입목 수고의 정확한 현장 측정이 어렵기 때문에 흉고직경 만을 이용한 회귀식보다 오히려 추정오차가 클 수도 있다(Whittaker and Marks, 1975; 박인협과 이석면, 1990). 박인협과 김준선(1989)은 산림지에서 흉고직경과 수고를 독립변수로 하는 회귀식이 흉고직경 만을 독립변수로 하는 회귀식에 비해 적합도가 다소 높았으나, 큰 차이를 보이지 않는다고 보고한 바 있다. 이와 같이, 단목의 탄소저장량은 흉고직경 만을 독립변수로 적용하여 산정하는 것이 활용의 용이성 및 실용성이 더욱 높을 것으로 판단된다.

표 5는 상기 도출한 회귀모델을 적용하여 산정한 수종 및 직경별 탄소저장량을 보여준다. 수목 1주당 탄소저장량은 직경생장과 더불어 증가하며, 단풍나무를 제외하면 직경급 간 그 차이는 직경이 커질수록 더욱 현저하였다. 수종별로는 동일 직경에선 대개 느티나무의 탄소저장량이 가장 높았고, 다음으로 왕벚나무, 은행나무 등의 순이었다. 단풍나무의 경우, 흉고직경 15cm 미만에서는 느티나무보다 탄소저장량이 높으나, 그 이상의 직경에서는 왕벚나무나 은행나무와 유사해지는 경향이였다.

국립산림과학원(2010a)은 국내 도시공원에서 개방 성장한 수목을 대상으로 레이저 덴드로미터를 이용한 순간적해 방법론을 적용하여 지상부 재적 산정식을 유도하고, 여기에 목재기 본밀도, 줄기 대비 지상부의 생체량 확장계수(은행나무 1.29), 지하부/지상부 비율(0.26), 탄소함량비(0.5) 등 각종 계수를 적용하여 탄소저장량을 추정한 바 있다. 재적식을 적용한 이 연구의 탄소저장량 추정치는 흉고직경 15cm 기준으로 은행나무가 본 연구결과와의 68%, 타 3개 수종이 21~32% 수준으로서 직접수확법에 의한 본 연구결과와 상당한 차이를 보였다. 이러한 차이는 재적식법에 의한 탄소저장량 산정 시 도시수목의 생장 특성을 반영한 수종별 고유의 각종 계수 즉, 생체량 확장계수, 지하부/지상부 비율 등을 필요로 하는데, 산림수목 계수의 대체 적용 과정에서 추정오차가 클 수 있기 때문이다. 한편, 느티나무의 직경별 탄소저장량은 국내 중부지방 산림지 참나무류의 경우(조현길과 안태원, 2000)와 유사하였다. 휘발유 10L의 소비는 약 5.7kg의 탄소를 대기에 배출하는데(http://co2.kemco.or.kr), 흉고직경 15cm인 느티나무 단목은 95L의 휘발유 소비

표 5. 수종별 단목의 탄소저장량 연구결과 비교(단위: kg)

구분	수종	흉고직경(cm)				
		5	10	15	20	25
직접수확법 ^a	단풍나무	1.1	25.3	49.6	73.9	-
	느티나무	3.9	20.6	54.1	107.5	183.1
	왕벚나무	2.9	15.5	41.3	82.9	-
	은행나무	2.7	13.9	36.6	72.5	123.2
재적식법 ^b	단풍나무	-	4.3	10.5	20.0	-
	느티나무	-	7.2	17.2	31.9	51.4
	왕벚나무	-	5.0	12.2	23.1	-
	은행나무	-	11.7	24.8	42.3	63.9
생체량 산정식 ^c	참나무류	3.5	19.0	51.6	104.7	181.3

^a: 본 연구의 탄소저장량 산정식 적용
^b: 국내 도시공원 수목의 재적식 적용(국립산림과학원, 2010a)
^c: 국내 중부지방 산림수목 대상(조현길과 안태원, 2000)

표 6. 수종별 생체량 확장계수 및 지하부/지상부 비율

수종	생체량 확장계수 ^a	지하부/지상부 비율 ^b
단풍나무	1.71±0.07	0.39±0.03
느티나무	1.87±0.12	0.35±0.05
왕벚나무	1.60±0.04	0.43±0.03
은행나무	1.68±0.06	0.67±0.03

^a: 줄기 생체량 대비 지상부(가지 및 잎 포함) 총 생체량 비율
^b: 지상부 총 생체량 대비 뿌리의 생체량 비율

로부터 배출되는 탄소량을 저장하고 있는 셈이다.

수종별 굴취수목의 생체량 확장계수와 지하부/지상부 비율은 표 6과 같다. 줄기 대비 지상부(줄기, 가지, 잎, 열매 등)의 생체량 확장계수는 수종에 따라 평균 1.60~1.87이었다. 국내의 도시수목에 관한 이들 연구는 거의 전무하며, 산림수목의 경우는 굴참나무 1.33, 상수리나무 1.43, 신갈나무 1.50 등이었다(국립산림과학원, 2010b). 도시수목의 생체량 확장계수는 산림수목보다 더욱 높은 것으로 분석되었는데, 이는 산림수목과 달리 도시수목은 개방 공간에서 성장하므로 경합이 상대적으로 적기 때문인 것으로 사료된다. 지하부/지상부 비율은 느티나무 0.35, 단풍나무 0.39, 왕벚나무 0.43, 은행나무 0.67 등으로서, 은행나무를 제외한 3개 수종은 상기 국내 산림수목의 0.33~0.42와 유사한 수준이었다.

3. 수종별 탄소흡수량 산정 회귀모델

그림 5와 표 7은 각각 수종별 단목의 직경생장에 따른 탄소흡수량 변화와 최종 도출한 탄소흡수량 산정 회귀모델을 제시한 것이다. 4개 수종별 회귀식은 모두 F 검정 결과, 통계적으로 유의하였고($p < 0.0001$), r^2 은 최소 0.94 이상으로서 적합도가 상당히 높았다. Y 절편 및 흉고직경의 회귀계수도 t 검정 결과,

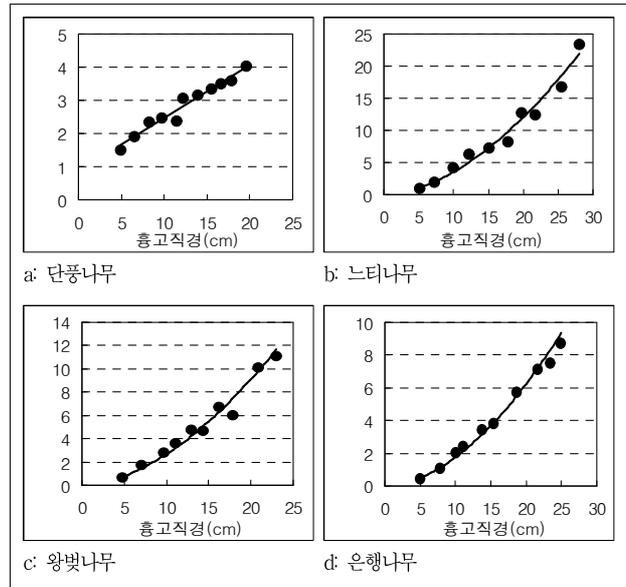


그림 5. 수종별 단목의 직경생장에 따른 탄소흡수량 변화

표 7. 수종별 단목의 탄소흡수량 산정 회귀모델

수종	회귀식*	r^2	p
단풍나무	$Y = -0.9608 + 0.1535 D$	0.9491	<0.0001
느티나무	$\ln Y = -2.8177 + 1.7715 \ln D$	0.9810	<0.0001
왕벚나무	$\ln Y = -3.0939 + 1.7702 \ln D$	0.9764	<0.0001
은행나무	$\ln Y = -3.6471 + 1.8287 \ln D$	0.9906	<0.0001

* Y: 탄소흡수량(kg/년), D: 흉고직경(cm)

모두 1% 수준에서 유의한 것으로 분석되었다. 탄소저장량의 경우처럼 독립변수로서 흉고직경뿐만 아니라 수고, 수관폭 등을 포함하는 다중회귀모델을 유도하였으나, 수고나 수관폭의 회귀계수가 5% 수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 단목의 탄소흡수량 역시 흉고직경만을 독립변수로 적용하여 산정하는 것이 활용의 용이성 및 실용성이 더욱 높을 것으로 사료된다.

표 8은 상기에서 도출한 회귀모델을 적용하여 산정한 수종 및 직경별 탄소흡수량을 나타낸다. 수목 1주당 탄소흡수량은 제시한 직경범위 내에서 탄소저장량의 경우와 유사하게 직경생장과 더불어 증가하였고, 단풍나무를 제외하면 직경급 간 흡수량의 차이도 직경이 커질수록 증가하는 경향이 있었다. 수종별로는 동일 직경에선 대개 느티나무의 탄소흡수량이 가장 높았고, 다음으로 왕벚나무, 은행나무 등의 순이었다. 단풍나무의 경우는 흉고직경 10cm 미만에선 왕벚나무 및 은행나무와 유사하거나 다소 높았으나, 그 이상의 직경에서는 연구대상 4개 수종 중 가장 낮은 흡수량을 나타냈다.

조현길과 조동하(1998)는 국내 주요 도시낙엽수를 대상으로 적외선가스분석기에 의한 CO₂ 교환율의 측정을 통해 단풍나무,

표 8. 수종별 단목의 탄소흡수량 연구결과 비교(단위: kg/년)

구분	수종	흉고직경(cm)				
		5	10	15	20	25
직접수확법 ^a	단풍나무	1.7	2.5	3.3	4.0	-
	느티나무	1.0	3.5	7.2	12.1	17.9
	왕벚나무	0.8	2.7	5.5	9.1	-
	은행나무	0.5	1.8	3.7	6.2	9.4
CO ₂ 교환율 측정법 ^b	단풍나무	0.3	1.2	2.9	5.4	-
	느티나무	1.4	7.1	17.9	34.3	56.9
	은행나무	0.4	1.7	4.0	7.3	11.5
생체량 산정식 ^c	참나무류	1.0	2.9	5.2	8.0	11.1

^a: 본 연구의 탄소흡수량 산정식 적용

^b: 국내 중부지방 도시수목의 CO₂ 교환율 측정으로부터 유도한 회귀식 적용 (조현길과 조동하, 1998)

^c: 국내 중부지방 산림수목의 직경생장률 이용(조현길과 안태원, 2000)

느티나무, 은행나무 등의 수종별 탄소흡수량을 추정하는 회귀식을 제시한 바 있다. 느티나무의 탄소흡수량은 본 연구의 직접수확법과 CO₂ 교환율 측정법 간에 적지 않은 차이를 나타냈으나, 단풍나무와 은행나무의 경우는 수종별 제시한 직경범위 내에서 양 방법 간 통계적으로 유의한 차이 없이 유사한 것으로 분석되었다($p > 0.05$). 연구대상 수종 중 왕벚나무의 탄소흡수량은 직경생장률 및 생체량 산정식을 적용한 국내 중부지방 산림지 참나무류의 경우(조현길과 안태원, 2000)와 유사하였다. 한편, 느티나무의 탄소흡수량은 산림지 참나무류보다 더욱 높았는데, 그 차이는 흉고직경 10cm 단목이 1.2배, 20cm의 경우 1.5배로서 직경이 커질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 흉고직경 15cm인 느티나무 한 그루는 해마다 약 13L의 휘발유 소비로부터 배출되는 탄소량을 상쇄하는 탄소흡수원 역할을 담당하였다.

IV. 결론

대기 CO₂ 농도 증가 및 기후변화를 지연 내지 완화하는 탄소흡수원으로서 도시녹지의 중요성이 부각되고 있으며, 도시공간간의 조경식재 사업은 탄소흡수 및 저감에 초점을 두고 있다. 그러나, 이 사업에 필요한 도시 조경수목의 탄소저장 및 흡수에 관한 국내 기반자료가 매우 미흡한 상황이다. 소수에 불과한 기존의 관련 연구도 직접수확법이 아닌 간접적인 접근방법을 통해 수행한 것으로서, 이에 대한 잠재적 오류의 검증과 보완을 필요로 한다. 본 연구는 주요 낙엽성 도시조경수를 대상으로 직접수확법을 통해 개체당 탄소저장 및 흡수를 계량화하여, 수종별로 탄소저장량과 탄소흡수량을 용이하게 추정하는 회귀모형을 도출하고, 도시녹지의 탄소저감 계량화에 필요한 기반정보를 구축하였다. 연구대상 수종은 중부지방 도시에 흔

히 식재되는 단풍나무, 느티나무, 왕벚나무, 은행나무 등 낙엽교목 4종이었다.

수종별로 유목에서 성목에 이르는 일정 간격의 흉고직경 크기를 고려한 수목을 구입하여, 현장에서 근굴취를 포함하는 직접수확법에 의해 개체당 부위별 생체량을 측정하였다. 개체별로 줄기, 가지, 잎, 뿌리 등으로 구분해 표본을 채취·건조시켜, 해당 개체의 부위별 및 전체 생체량을 산정하고, 탄소저장량을 산출하였다. 흉고 부위의 수간 원편을 채취하여 수령 및 직경생장을 분석하고, 탄소흡수량을 산정하였다. 흉고직경을 독립변수로 수종별 생장에 따른 단목의 탄소저장 및 흡수를 계량화하는 활용 용이한 방정식을 유도하였다. 또한, 수종별 생체량 확장계수, 지하부/지상부 비율, 연간 직경생장 등 도시 조경수목의 직접 벌목 및 근굴취의 난이성에 기인한 기존 연구의 한계점을 보완하는 관련 기반정보를 제시하였다.

본 연구에서 도출한 8개의 회귀모델 즉, 흉고직경을 독립변수로 4개 수종별 단목의 탄소저장량과 탄소흡수량을 용이하게 추정하는 방정식은 r^2 가 0.94~0.99 범위로서 적합도가 상당히 높았으며, Y 절편 및 흉고직경의 회귀계수도 1% 수준에서 유의성을 보였다. 단목의 탄소저장량과 탄소흡수량은 모두 직경생장과 더불어 증가하였고, 직경급 간 그 차이도 직경이 커질수록 증가하는 경향이였다. 동일 직경에서는 대개 느티나무가 가장 높았고, 다음으로 왕벚나무, 은행나무 등의 순이었다. 단풍나무의 경우는 흉고직경 15cm 미만에서는 타 수종과 유사하거나 다소 높았으나, 그 이상의 직경에서는 가장 낮은 흡수량을 나타냈다. 흉고직경 15cm인 단목의 탄소저장량은 느티나무 54.1kg, 단풍나무 49.6kg, 왕벚나무 41.3kg, 은행나무 36.6kg 등이었다. 탄소흡수량의 경우는 각각 느티나무 7.2kg/년, 왕벚나무 5.5kg/년, 은행나무 3.7kg/년, 그리고 단풍나무가 3.3kg/년이었다.

수종별 회귀모델을 적용한 단목의 탄소흡수량은 느티나무의 경우 CO₂ 교환율 측정법에 의한 기존 연구결과보다 낮았으나, 단풍나무와 은행나무의 경우는 양 방법 간 통계적으로 유의한 차이 없이 유사하였다. 반면, 탄소저장량 산정치는 재적식법에 의한 기존 연구결과와 적지 않은 차이를 나타냈다. 그 차이는 재적식법에 의한 탄소저장량 산정 시 도시수목의 생장특성을 반영한 수종별 고유의 각종 계수를 필요로 하나, 산림수목 계수의 대체 적용에 따른 추정오차가 클 수 있기 때문이다. 참나무류 산림수목의 생체량 확장계수는 수종에 따라 1.33~1.50이었는데, 본 연구대상 굴취수목의 경우는 수종별로 1.60~1.87로서, 도시수목이 대개 개방 성장하므로 경합이 적어 산림수목보다 더욱 높았다. 지하부/지상부 비율은 은행나무가 0.67로서 상대적으로 높았고, 타 3개 수종은 0.35~0.43으로서 국내 참나무류 산림수목 0.33~0.42와 유사하였다.

본 연구결과는 정부나 지자체의 도시녹지 사업과 관련하여

조경수목의 탄소저감을 평가하는 공공기반기술로서 유용하게 활용될 수 있다. 또한, 도시수목의 벌목과 근굴취의 난이성에 기인하여 생체량 확장계수, 지하부/지상부 비율, 직경생장 등 산림수목의 계수를 대용한 기존 연구의 한계점을 극복하는 중요한 기반정보가 될 것으로 기대한다. 본 연구에서는 주요 낙엽성 도시조경수들에 한정하여 그들의 탄소저감을 계량화하는 산정식들을 제시하였다. 향후 연구는 직접수확법에 의해 상록성 조경수들의 탄소저장 및 흡수도 산정하여, 낙엽수종의 경우와 비교하고 도시녹지 탄소저감 계량화의 타당성과 신뢰성을 제고할 필요가 있다.

감사의 글

연구대상 조경수의 현장굴취를 흔쾌히 지원한 ㈜수프로(대표 채일)의 윤택승 소장과 김홍덕 과장께 감사드리며, 또한 생체량 측정을 비롯한 연구수행에 적극 협조한 강원대학교 조경학과 도시생태연구실의 권현지, 김진영, 박혜미 대학원생에게 고마움을 표한다.

인용문헌

1. 국립산림과학원(2007) 산림 바이오매스 및 토양탄소 조사·분석 표준.
2. 국립산림과학원(2010a) 도시녹지 온실가스 인벤토리: 서울시를 대상으로. 국립산림과학원 연구보고, pp. 10-19.
3. 국립산림과학원(2010b) 산림 온실가스 인벤토리를 위한 주요 수종별 탄소배출계수. 국립산림과학원 연구보고, pp. 10-25.
4. 농업과학기술원(2000) 토양 및 식물체 분석법.
5. 박은진, 강규이(2010) 경기도 도시가로수의 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량 산정. 한국환경생태학회지 24(5): 591-600.
6. 박인협, 김준선(1989) 한국산 4개 지역형 소나무천연림의 물질현존량 추정식에 관한 연구. 한국임학회지 78(3): 323-330.
7. 박인협, 이석면(1990) 한국산 4개 지역형 소나무 천연림의 물질생산에 관한 연구. 한국임학회지 79(2): 196-204.
8. 방광자, 이종석(1995) 우리나라 조경 수목의 식재 분포에 관한 연구. 한국조경학회지 23(1): 67-94.
9. 손영모, 이경학, 정영교(1997) 비선형 성장함수를 이용한 임분생장 추정. 한국임학회지 86(2): 135-145.
10. 송철영, 장관순, 박관수, 이승우(1997) 신갈나무와 굴참나무 천연림의 탄소고정량 분석. 한국임학회지 86(1): 35-45.
11. 정성호, 최문길, 이근수(1983) 중부지방 주요활엽수의 직경성장에 관한 조사연구. 한국임학회지 60: 24-29.
12. 조현길, 이경재, 권전오(1998a) 서울시의 토지이용 및 녹지구조. 환경생태학회지 12(1): 30-41.
13. 조현길, 이기의, 윤영환, 서옥하(1998b) 강원도 일부 도시들의 토지이용 및 녹지구조. 한국조경학회지 25(4): 171-183.
14. 조현길(1999) 강원도 일부도시의 경관내 탄소흡수 및 배출과 도시녹지의 역할. 한국조경학회지 27(1): 39-53.
15. 조현길, 안태원(2000) 자연생태계 수목의 생장에 따른 탄소저장 및 흡수량 지표. 한국환경생태학회지 14(3): 175-182.
16. 조현길, 안태원(2001) 도시 침엽수에 의한 연간 CO₂ 흡수 및 대기정화-소나무와 잣나무를 대상으로. 한국환경생태학회지 15(2): 118-124.
17. 조현길, 조동하(1998) 도시 주요조경수종의 연간 CO₂ 흡수. 한국조경학회지 26(2): 38-53.
18. 한국조경학회(2007) 조경설계기준. 서울: 기문당.
19. Ajtay, L. L., P. Ketner and P. DuVigneaud(1979) Terrestrial production and phytomass. In Bolin, B., E. T. Degens, S. Kempe, and P. Ketner, eds., The Global Carbon Cycle, SCOPE Report No. 13. New York: John Wiley & Sons. pp. 129-181.
20. Chow, P. and G. L. Rolfe(1989) Carbon and hydrogen contents of short rotation biomass of five hardwood species. Wood and Fiber Science 21(1): 30-36.
21. Nowak, D. J. and D. E. Crane(2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution 116: 381-389.
22. Ovington, J. D.(1956) The composition of tree leaves. Forestry (British Journal) 29: 22-29.
23. Pingrey, D. W.(1976) Forest products energy overview. In Energy and the Wood Products Industry. Madison, WI: Forest Products Research Society. pp. 1-14.
24. Reichle, D. E., B. E. Dinger, N. T. Edwards, W. F. Harris and P. Sollins(1973) Carbon flow and storage in a forest ecosystem. In Woodwell, G. M. and E. V. Pecan, eds., Carbon and the Biosphere. Proceedings of the 24th Brookhaven Symposium in Biology. Upton, NY: US Atomic Energy Commission, Office of Information Services. pp. 345-365.
25. Whittaker, R. H. and P. L. Marks(1975) Methods of assessing terrestrial productivity. In Lieth, H. and R. H. Whittaker, eds., Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag. pp. 55-118.
26. <http://co2.kemco.or.kr>
27. <http://www.climateactionreserve.org/how/protocols>
28. <http://www.forest.go.kr>
29. <http://www.fs.fed.us/ccr/topics/urban-forests>

원 고 접 수 일: 2012년 8월 10일
 심 사 일: 2012년 9월 4일(1차)
 게재 확정 일: 2012년 9월 9일
 3인익명 심사필