

도시 주요조경수종의 연간 CO₂ 흡수

조현길* · 조동하**

*강원대학교 녹지조경학과

**강원대학교 식물응용과학부

Annual CO₂ Uptake by Urban Popular Landscape Tree Species

Jo, Hyun-Kil* · Cho, Dong-Ha**

*Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University

**Division of Applied Plant Science, Kangwon National University

ABSTRACT

This study quantified annual net carbon uptake by urban landscape trees and provided equations to estimate it for *Ginkgo biloba*, *Platanus occidentalis*, *Zelkova serrata* and *Acer palmatum*, based on measurement of CO₂ exchange rate for two years' growing seasons from Sep., 1995 to Aug., 1997. The carbon uptake was significantly influenced by photosynthetic capacity, photon flux density and pruning.

Ginkgo biloba showed the highest rate of net CO₂ uptake per unit leaf area and *Acer palmatum* did the lowest rate among those species. A tree shaded by adjacent building over the growing seasons showed net CO₂ uptake per unit leaf area much lower than another tree of the same species less shaded. Annual net carbon uptake per tree (minus carbon evolution by respiration of woody parts and pruning) was 19 kg for *Zelkova serrata*, but only 1 kg for *Ginkgo biloba* and *Platanus occidentalis* with crown volume dwarfed from pruning. One *Zelkova serrata* tree annually offset carbon emission from consumption of about 32 liter of gasoline or 83 kWh of electricity.

Strategies to improve CO₂ uptake by urban landscape trees include planting of species with high photosynthetic capacity, sunlight-guaranteed road and building layout for street trees, planting of shade-tolerant species in the north of buildings, and relocation of utility lines to underground and minimized pruning.

I. 서론

온실효과 및 기후변화는 요즘 가장 심각한 세계 환경관심사 중의 하나이다. 온실효과를 야기시키는 CO₂, CH₄, CFCs, N₂O, 대류권의 O₃, 성층권의 수증기 등 여러가지 개스들 중, CO₂는 현재 기후변화를 야기시키는데 있어 약 50%의 영향력을 발휘하는 주요 온실개스(Greenhouse gas)이다(Ciborowski, 1989; Rodhe, 1990). 따라서, 대기 CO₂는 지구의 기후변화와 관련하여 집중적인 연구의 대상이 되어 왔다. 대기 CO₂의 현 농도는 산업화 이전의 280 ppm으로부터 약 25% 증가하였으며 연증가율은 0.4%로 추정된다(Post et al., 1990). 이와 같은 CO₂ 농도의 증가는 자동차, 발전소, 공장, 주택 등에서의 화석연료의 사용과 무분별한 삼림벌채에 기인된다(Detwiler and Hall, 1987; Schneider, 1990).

대기 CO₂ 농도의 저감을 위한 노력은 최근 도시녹지의 그 효과를 검토하는 연구들을 태동시켰다. Nowak(1993; 1994)은 미국 California주의 Oakland시와 Illinois주의 Chicago시에 식재된 수목들의 탄소고정량을 산정하고, 그에 근거하여 미국내 전 도시수목들의 대기탄소농도의 감소효과를 검토하였다. Jo와 McPherson(1995)은 Chicago시 주거지역에서의 탄소순환을 모델링하고 대기탄소농도의 저감을 위한 녹지계획 및 관리 전략을 제시하였다. 국내에서는, 조현길 등(1995)이 춘천시를 대상으로 도시녹지에 의한 탄소고정을 계량화하고, 대기 CO₂ 농도의 감소에 작용하는 도시녹지의 기능을 평가한 바 있다.

수목의 연간 탄소흡수는 직접 벌목 또는 생장추에 의한 목편채취(Coring)로부터 연간 직경생장의 측정과 상대생장식(Allometric equation)의 이용에 기초하거나, 적외선개스분석기(Infrared gas analyzer)에 의한 CO₂ 교환율의 측정에 근거하여 계량화될 수 있다. 도시수목들은 직접 벌목이 불가하며 목편채취로부터 직경생장을 정확히 측정한다 해도, 다양한 수종별 상대생장식이 거의 부재하

므로 전자의 방법에 의한 도시수목의 탄소흡수량 산정은 쉽지 않다. 상기 선행연구들의 경우, 대기탄소고정은 주로 자연지에서 성장하는 수목들을 대상으로 연구된 상대생장식들을 대용하여 계량화되었다.

본 연구는 적외선개스분석기에 의한 CO₂ 교환율의 측정을 통해 도시수목들의 연간 순 CO₂ 흡수를 계량화하였다. 도시수목은 자연삼림환경이 아닌 도시환경에서 성장할 뿐만 아니라, 수목간 경합조건 차이, 전정을 포함한 관리투입 등에 의해 생장에 의한 생체량(Biomass) 축적의 특성이 자연지 수목과는 다를 것이다. 특히, 심한 전정은 수목의 생체량 축적이나 탄소고정에 현저한 악영향을 미칠 것으로 예측된다. 그러나, 도시수목들을 대상으로 전정 및 호흡량을 고려한 실질적인 연간 순 CO₂ 흡수량을 산정한 연구는 아직 찾아볼 수 없다. 본 연구의 목적은 도시의 주요 조경수종별 수목 한 개체당 흡수하는 연간 순탄소량은 얼마나 되는지를 산정하고, 그들 수종별 탄소흡수량방정식을 제시하여 향후 도시수목들의 탄소흡수를 계량화하는데 필요한 기반정보를 제공하는 것이었다.

II. 연구내용 및 방법

1. 측정대상수종과 장소 선정

도시의 모든 조경수종들을 대상으로 한 CO₂ 교환율의 연간 반복적 측정은 결코 쉽지 않다. 따라서, 춘천시의 도심내에 식재된 수종들 중, 은행나무(*Ginkgo biloba*), 플라타너스(*Platanus occidentalis*), 느티나무(*Zelkova serrata*), 단풍나무(*Acer palmatum*) 등 총 4개 교목종이 그 측정을 위해 선정되었다. 선정이유는 이들이 춘천시를 포함한 한국의 여러 도시들의 가로, 공공용지, 다세대주택단지 및 공원에 흔히 식재되는 조경수종이기 때문이었다(이종석 등, 1979; 조현길 등, 1998a; 1998b).

측정장소로는 수종의 식재장소 및 CO₂ 교환율에 영향을 미치는 미기후의 차이를 고려하여 3개소를 선정하였다. 그들은 도심내 주간선로들인 신흥로상의 팔호광장인접지(이하 팔호광장이라 약칭) 및 중앙로의 춘천세무서인접지(이하 중앙로로 약칭)를 비롯하여 강원대학교 인문대학관 식재대(이하 강원대학교로 약칭)이었다. 팔호광장에서는 은행나무, 중앙로에서는 플라타너스, 강원대학교에서는 느티나무와 단풍나무 등 수종별로 정상적인 생장을 보이는 개체를 선정하였다. 느티나무는 건물로부터 서남향에, 단풍나무는 남향에 각각 위치한 것이었다. 가로수인 은행나무와 플라타너스의 경우, 주변건물의 일조방해에 의한 가절된 CO₂ 흡수량의 차이를 파악하기 위해 가로 양측의 두그루씩을 그 측정에 포함하였다. 즉, 동북-서남 방향의 간선로인 신흥로상에서는 가로 양측의 동남향과 서북향에 식재된 두 은행나무(이하 동남측 및 서북측 은행나무로 약칭)를, 그리고 중앙로에서는 이와 동남-서북 방향으로 연결되는 교차로 양측의 동북향과 서남향에 식재된 두 플라타너스(이하 동북측 및 서남측 플라타너스로 약칭)를 측정대상으로 선정하였다. 따라서, CO₂ 교환율과 관련 환경인자의 실제적인 측정위치와 측정수목은 각각 총 6개소 및 6개체가 된다.

2. 환경인자의 측정

광량, 온도, 습도, 대기 CO₂ 농도 등은 수목의 CO₂ 교환율을 좌우하는 주요한 환경인자들이다(Bernatzky, 1978; Kramer, 1981; Etherington, 1982; Nobel, 1983; Ceulemans and Saugier, 1991). 본 연구는 상기한 측정대상수종들의 CO₂ 교환율과 환경인자들간의 상호작용을 계량화하기 위하여, 수목의 생장기간인 5월부터 10월까지 6개월간 매월 초순, 중순 및 하순의 3회, 해당일 오전 8시경부터 익일 오전 5시경까지 3시간 간격으로 8회에 걸쳐 광량, 온도, 습도 등의 환경인자들을 측정하였다. 이 측정은 1995년 9월부터 1997년 8월까지 2년간 반복 실시되었다.

광량은 광량계(LI-COR의 LI-189)를 이용하여 대상수목들의 수관 중간부위에서 측정되었다. 수관을 중심으로 한 방향별 광량차이를 고려하여 수관외부와 내부 각각 8개 방향(동, 동남, 남, 서남, 서, 서북, 북 및 동북)에 걸쳐 수목별로 총 16개 지점의 광량을 측정하였다. 측정장소별 대기온도와 습도는 휴대용 온도습도계(Teston의 TH-100)를 이용하여 대상수목들의 수관 및 수관을 중심으로 한 주변부에서 측정되었다(야간의 경우 전자식자기온습도계 이용: Sato의 R-704). 대기 CO₂ 농도는 수목의 CO₂ 교환을 측정시 운반형 적외선 개스분석기를 이용하여 측정되었다.

3. CO₂ 교환율의 측정

운반형 적외선개스분석기(ADC의 LCA-4)를 이용하여 현지에서 전기한 4개 수종들의 잎들에 의한 단위시간 및 단위면적당 CO₂ 흡수량(광합성량)과 방출량(호흡량)을 측정하였다. 이 측정은 수목의 생장기인 5월부터 10월까지 6개월간 매월 중순에, 해당일 오전 8시경부터 오후 11시경까지(각 측정시간의 최대시간차는 이동관계로 인해 30분임) 3시간 간격으로 6회에 걸쳐 실시되었다. 이 측정 역시 환경인자의 경우처럼 1995년 9월부터 1997년 8월까지 기상환경의 차이를 고려하여 2년간 반복 수행되었다.

엽시료는 측정일에 각 수종의 평균적인 엽령에 해당되고, 측정시간대에 평균적인 광량을 받고 있다고 판단된 것을 대상으로 수관 중앙부에서 채취되었다. 이때, 엽시료의 건조 가능성을 피하기 위하여 시료가 부착된 가지를 충분한 길이로 절단하였다. 매 측정시마다 3개의 시료를 채취하여 3반복으로 CO₂ 교환율을 측정하였으며, 각 반복의 측정시간길이는 25-30초이었다. 적외선개스분석기의 센서 연결선이 수관 중앙부에 연장될 수 있을 만큼 수고가 낮은 느티나무와 단풍나무는, 가지들을 절취하지 않은 채 자연상태하에서의 잎의 CO₂ 교환율을 측정하였다.

4. CO₂ 교환율회귀식 및 월별 CO₂ 흡수량의 산출

상기한 CO₂ 교환율 측정시 그에 영향을 받는 환경인자들을 적외선개스분석기로 자동측정하여, 월별 환경인자들의 변화와 관련된 각 수종의 CO₂ 교환율을 계량화하는 회귀식을 산출하였다. 즉, 광량, 온도, 습도 및 대기 CO₂ 농도를 독립변수로 하고 CO₂ 교환율을 종속변수로 하되, 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 회귀식과 독립변수를 최종 산출하였다. 수목의 CO₂ 흡수율은 생리적 특성상 유사한 환경조건하에서도 계절별로 차이가 있고(Singh et al., 1996), 실제로 모든 계절에 함께 적용가능한 회귀식은 성립되지 않아, 측정연도 및 계절별로 구분된 수종별 적합한 회귀식들을 유도하였다. 상관계수의 유의성 검정 결과 측정연도의 해당계절을 위한 적합한 회귀식이 성립되지 않은 경우, 그를 위한 회귀식은 2개년도를 통합한 동일계절의 측정치들로부터 유도되었다.

산출된 CO₂ 교환율회귀식들에 매일 초, 중 및 하순의 시간별 수관내외부 16개지점의 광량과 그리고 온도, 습도 등의 독립변수 측정치들을 대입하여, 해당월의 단위시간 및 단위엽면적당 주간의 평균 CO₂ 흡수량과 야간의 평균 CO₂ 방출량을 산정하였다. 야간의 방출량은 CO₂ 교환율회귀식으로부터의 산정치와 호흡이 나타난 측정반복수의 평균치를 평균하여 산출되었다. 이 단위시간당 CO₂ 흡수 및 방출량에 월별 평균 일장 및 야장시간을 각각 곱하고, 산출된 총흡수량에서 총방출량을 제감하여 매일 하루의 단위엽면적당 순 CO₂ 흡수량을 산정하였다. 그리고, 이것에 비가 내린 날을 제외한 해당월의 일수를 곱하여 각 수종의 월별 단위엽면적당 순 CO₂ 흡수를 계량화하였다.

5. 엽면적의 측정

단위엽면적당 CO₂ 흡수량을 수목개체별 CO₂ 흡수총량으로 전환하기 위하여, 수종별로

표본채취한 잎들의 면적을 측정하고 이를 토대로 개체의 총엽면적을 산출하였다. 8월에 직경자(Caliper)를 이용하여 가지의 원경(元徑: 기부직경)을 측정하고, 원경이 상이한 가지(잎포함)를 수종별로 10-11개씩 총 42개를 표본채취하였다. 이들 표본을 채취 즉시 이중비닐백에 넣어 실험실로 운반한 후, 각 가지표본별로 잎을 임의로 20개씩, 수종별로 총 180-220개를 표본채취하여 엽면적측정기(Delta T Devices LTD의 Delta T-AMS)에 의해 각 잎의 면적을 측정하였다. 그리고, 가지표본별 총착엽수를 파악하여 가지원경의 차이로부터 수종별 가지의 총엽면적을 추정하는 회귀식을 산출하였다. 한편, 각 가지표본별로 잎을 임의로 30개씩 표본채취하고, 이들을 65℃하의 항온건조기에서 48시간 동안 건조시켜 수종별 엽중을 측정하였다.

낙엽후인 11월에 수종별로 크기가 다양한 수목들을 19-20개체씩, 총 79개체를 선정하여, 개체별로 흉고직경, 수고, 수형, 수관고, 수관폭 등을 비롯하여 모든 가지의 원경을 측정하였다. 상기한 방법으로 산출된 수종별 가지의 엽면적회귀식을 적용하여 각 가지의 엽면적을 구한 후, 그것을 적산하여 수관 전체의 총엽면적을 산정하였다. 이를 토대로, 수목의 흉고직경, 수고, 수관체적 등을 독립변수로 하여 수종별 총엽면적을 산정하는 가장 적합한 회귀식과 변수를 결정하였다.

6. 가지호흡량의 측정

여름 및 가을에 운반형 적외선개스분석기(ADC의 LCA-2)를 이용하여 연구대상수종들의 가지호흡량을 측정하였다. 직경이 다양한 가지를 여름의 경우 수종별로 17-21개씩 총 73개를, 그리고 가을엔 10-16개씩 총 46개를 적외선개스분석기의 챔버(Chamber)에 넣을 만한 크기로 절단 채취하였다. 호흡량은 채취 즉시 현지에서 측정되었으며, 이때 절단부분을 불투기성 테이프로 집착하였다. 측정에 이용된 가지표본들을 실험실로 운반하여 곧 65℃하의

항온건조기에서 항량이 될 때까지 건조시켜, 그들의 건중량을 측정하고 단위중량당 호흡량을 산출하였다.

가지의 단위중량당 호흡량을 바탕으로 수목 한개체의 모든 가지에 의한 총호흡량을 계량화하기 위해, 가지원경별 가지중량을 추정하는 회귀식을 산출하였다. 여기에서 이용된 가지표본들은 엽면적 측정을 위해 채취된 것들이었으며, 그들의 중량역시 65℃하의 항온건조기에서 항량이 될 때까지 건조시켜 측정되었다. 그리고, 수목개체당 총엽면적 추정을 위한 회귀식 산출의 경우와 같은 과정과 방법에 의해, 수종별 수목개체의 총가지중량을 산정하는 가장 적합한 회귀식과 변수를 결정하였다.

7. 전정량의 측정

도심에 식재된 수목들, 주로 가로수들은 전선, 전화선 등 가공선(架空線)의 보호차원에서 매년의 성장량이 전정된다. 춘천시의 가로수들은 보통 해마다 2-3월에 한번 전정되는 것으로 나타났다(춘천시 산림녹지과의 사진, 1996). 수목들이 성장을 통해 대기의 CO₂를 흡수 고정하더라도, 전정은 그 양만큼 소각이나 분해과정을 통해 대기로 CO₂를 다시 방출하는 행위가 된다. 본 연구에서는 도심의 수목이 연간 흡수하는 실질적인 대기 CO₂의 양을 파악하기 위하여, 춘천시의 대표적 가로수인 은행나무와 플라타너스의 연간 전정을 계량화하였다.

춘천시청과 한국전력공사의 협조를 얻어, 1996년 및 1997년 3월의 2년에 걸쳐 은행나무 41개체와 플라타너스 40개체, 총 81개체의 전정량을 측정하였다. 은행나무는 우두동(19개체)과 윤교동(22개체)의 간선도로상에 식재된 개체들이었고, 플라타너스는 삼천동(19개체)과 소양동(21개체)의 간선도로상에 식재된 개체들이었다. 전정은 한국전력공사로부터 전정용역을 받은 한 사업체에 의해 수행되었다. 각 개체별로 전정 직후 현지에서 전정된 가지들을 모아 생중량을 측정한 후, 그 가지들의 일부를 임의로 표본채취하여 65℃에서 항량이

될 때까지 건조시켜 건중량을 측정하였다. 그리고, 건중량대 생중량 평균비를 구하여 개체별로 전정량 전체의 건중량을 산정하였다. 전정되기 전에 각 개체의 흉고직경, 수고, 수관폭, 수관고 등을 측정하였으며, 이들 및 수관체적을 독립변수로 하여 전정량과의 가장 적합한 회귀식과 변수를 결정하였다.

8. 연간 순탄소흡수량의 산정

월별 단위엽면적당 CO₂ 흡수량에 해당월의 총엽면적을 곱하여 매월의 CO₂ 흡수총량들을, 그리고 2개년의 월별 평균치를 적산하여 연간 CO₂ 흡수총량을 산출하였다. 매월 중순에 연구대상수목들의 수형, 수관폭, 수관고 등을 측정하여 월별 수관체적의 변화를 파악하였고, 수관체적을 독립변수로 하는 엽면적회귀식을 적용하여 그들의 월별 총엽면적을 산정하였다. 5월의 경우, 신엽(新葉)의 미숙한 성장을 고려하여 수종별로 20개씩의 크기가 다른 잎들을 골고루 표본채취하여 평균 엽면적을 구하고, 상기의 여름에 채취된 잎들의 평균면적과의 비를 구하여 엽면적회귀식에 의해 산출된 총엽면적을 보정하였다.

한편, 월별 수관체적의 변화대신 여름 혹은 가을에 한번 측정된 흉고직경, 수고, 수관체적 등을 독립변수로 하는 적합한 엽면적회귀식의 적용과, 2개년의 단위엽면적당 순 CO₂ 흡수량의 월별 평균치를 적산하여 연간 CO₂ 흡수총량을 산정하였다. 그러나, 이 산정치는 부정확할 수 있으므로 월별 수관체적의 변화에 근거하여 산정된 연간 CO₂ 흡수총량과의 비를 구하여 보정계수를 산출하였다. 이 방법을 선택한 이유는 제시할 연간탄소흡수량 방정식의 일반적 활용상, 월별 수관체적의 변화를 측정해야 하는 번거로움을 덜기 위함이었다.

이와 같이 산정된 연간 CO₂ 흡수총량에서 비동화기관의 호흡량과 전정량을 제감하여 수목의 연간 순 CO₂ 흡수를 계량화하였다. 수종별 가지의 연간 호흡량은 여름과 가을의 단위 시간 및 단위가지중량당 가지호흡량 측정치에

회귀식에 의한 총가지중량 산정치와 해당계절의 총시간길이를 곱하여 산출되었다. 봄철의 가지호흡은 가을의 측정치를 대응하였으며 겨울의 경우는 무시되었다. 수목기관간 호흡량비에 근거하여, 줄기의 호흡량은 가지호흡량에 0.7을, 그리고 뿌리의 경우는 0.3을 곱하여 비동화기관의 총호흡량을 산출하였다(根岸賢一郎, 1970; Reichle et al., 1973). 흡수 및 방출된 CO₂의 양은 그 총분자량의 탄소분자량 비인 0.2727를 곱하여 탄소량으로 전환되었다. 연간 전정량은 은행나무와 플라타너스에 한하여 전정량회귀식의 적용에 의해 추정되었다. 수목 건중량의 약 50%가 탄소함량이므로 (Reichle et al., 1973; Pingrey, 1976; Ajtay et al., 1979; Chow and Rolfe, 1989; 송철영 등, 1997), 산정된 전정량은 0.5를 곱하여 탄소량으로 전환되었다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 측정대상수목의 성장현황

Table 1은 CO₂ 교환율의 측정대상이었던

조경수들의 크기, 성장장소 등을 요약한 것이다. 이들의 흉고직경은 12-22cm로서 성목이라기보다는 유목에 더 가까운 한창 성장과정에 있는 수목들이었다. 은행나무와 플라타너스의 수관체적은 흉고직경의 크기에 비해 타 수종들의 경우보다 상대적으로 적는데, 이는 해마다 반복되는 전정에 기인된 것이다.

2. 장소별 미기후 특성

Figure 1은 측정장소별 조경수들의 수관에 조사된 2개년 평균 최대광량(수관외부의 어느 방향에 조사된 광량 중 최대치)의 월별 변화를 보여 준다. 각 수목들의 최대광량은 대체로 성장기간 중 7, 8월에 680-880 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로서 가장 높았다. 서남측 플라타너스는 인접한 건물의 일조방해로 인해 전 성장기간에 걸쳐 가장 적은 광량을 받고 있었으며, 여름철의 최대 광량도 약 630 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에 불과하였다. 이 플라타너스를 제외한 하루중 최대광량은 오후 2시경에 가장 높았고, 그 시각의 성장기간 평균광량은 장소 및 수목에 따라 970-1,170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이었다. 수관밀도를 반영하는 최소 광량(수관내부의 어느 방향에 조사된 광량 중

Table 1. Species and dimensions of landscape trees and their growing places selected in Chuncheon to measure CO₂ exchange rate*

Species	Place**	DBH (cm)	Height (m)	Crown	
				Width (m)	Volume (m ³)
<i>Ginkgo biloba</i>	Palho-SE	20.6	7.1	4.0	14.7
	-NW	22.4	8.0	4.5	28.6
<i>Platanus occidentalis</i>	Jungang-SW	12.0	6.9	4.5	15.9
	-NE	15.1	7.0	4.9	18.8
<i>Zelkova serrata</i>	KNU	15.4	5.0	5.2	31.6
<i>Acer palmatum</i>	KNU	16.2	4.6	5.5	34.3

Note: * Tree dimensions measured in Sep., 1996.

** Palho-SE and NW indicate respectively southeastern and northwestern side opposite to each other at a place adjacent to Palho Intersection on SW-NE Sinheung Avenue. Jungang-SW and NE mean respectively southwestern and northeastern side opposite to each other at a place on a SE-NW street crossing with Jungang Avenue near to the Chuncheon Tax Office. KNU stands for a place within Kangwon National University (the same with subsequent figure and tables).

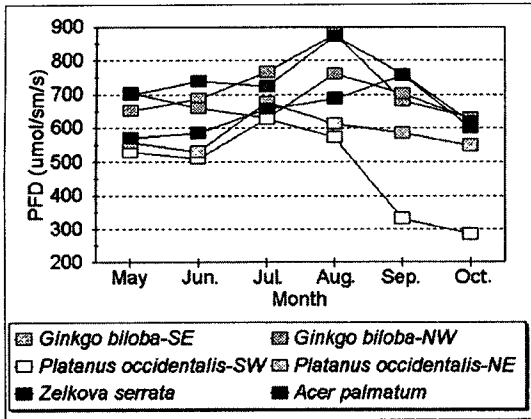


Figure 1. Monthly changes of maximum photon flux density (PFD) at crowns of landscape trees in different urban settings *

Note: * PFD averaged for two years' growing seasons from Sep., 1995 to Aug., 1997.

최소치)은 전 수종에 걸쳐 큰 차이없이 최대광량의 2-3%(신엽의 성장초기인 5월을 제외한 성장기간 평균)이었다.

Table 2에서와 같이, 성장기간 동안의 평균온도는 강원대가 팔호광장 및 중앙로보다 약 1℃ 낮았고, 평균습도는 강원대가 팔호광장보다 3% 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 장소별 온습도차이는 식생피도와 토지피복유형의 차이에 기인된다(조현길, 1997). 세장소에서 하루 중 온습도의 변화를 분석해 보면, 온도가 가장 높은 오후 2시경에 습도는 가장 낮은 반면, 습도가 가장 높은 오전 5시경에 온도는 가장 낮았다.

Table 3은 성장기간 동안 측정된 장소별 월별 대기 CO₂ 농도를 나타내 준다. 세장소에서 월별 CO₂ 농도는 5월 혹은 10월에 가장 높고 8월에 가장 낮았다. 강원대에서의 CO₂ 농도는 성장기간 평균 약 375 ppm으로서, 중앙로 및 팔호광장에서 395 ppm보다 약 20 ppm 낮았다. 이는 차량통행량의 다소와 관계된 것으로 판단된다. 세계의 대기 CO₂ 농도는 약 350 ppm인데(Post et al., 1990; Lashof and Tirpak, 1991), 이에 비하면 춘천시 도심의 CO₂ 농도는 13% 정도 높은 것으로 나타났다.

Table 3. Concentration of atmospheric CO₂ (ppm) at different places averaged for two years' growing seasons from Sep., 1995 to Aug., 1997

Place	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Mean
Palho	421.2	394.3	379.9	366.1	392.2	429.4	397.2
Jungang	417.4	380.9	377.4	363.5	393.4	431.8	394.1
KNU	393.2	383.0	360.4	345.9	372.1	385.6	373.4

3. 단위엽면적당 CO₂ 흡수량

Table 4는 각 조경수종의 잎들에 의한 측정연도 및 계절별 CO₂ 교환율을 산정하기 위해 유도된 회귀식들을 보여 준다. 여기에서 Y₁식은 CO₂ 흡수만을, 그리고 Y₂식은 CO₂ 흡수 및 방출 모두를 추정하는 회귀식이다. 계절

Table 2. Monthly changes of temperature and humidity at different places averaged for two years' growing seasons from Sep., 1995 to Aug., 1997*

Place	May		Jun.		Jul.		Aug.		Sep.		Oct.		Mean	
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
Palho	21.5	49	25.5	62	28.1	68	27.9	65	21.4	67	15.0	64	23.2	62
Jungang	21.3	48	25.4	63	27.7	69	27.4	66	20.9	70	15.0	63	23.0	63
KNU	19.8	52	25.0	63	27.0	72	26.8	66	20.5	68	14.4	66	22.2	65

Note: * T: Temperature (℃), H: Humidity (%).

Table 4. Regression equations for each species generated to estimate seasonal CO₂ exchange rate by leaves of urban landscape trees

Species	Season*	Equations**	R ²	N
<i>Ginkgo biloba</i>	Fall, 95	$\ln Y_1 = -6.2486 + 0.3288 \ln X + 0.6278 \ln Y + 1.0494 \ln Z$	0.68	10
		$Y_2 = -0.6889 + 0.0258 X - 0.00002 X^2$	0.72	18
	Spring, 96	$\ln Y_1 = -0.0213 + 0.4876 \ln X - 1.1104 \ln Y + 0.6653 \ln Z$	0.68	14
		$Y_2 = -0.9543 + 0.0478 X - 0.00005 X^2$	0.75	11
	Summer, 96	$Y_1 = 45.748 - 0.0006 X - 0.3373 Y - 0.4463 Z$	0.73	7
		$Y_2 = 0.4944 + 0.0378 X - 0.00002 X^2$	0.84	12
	Fall, 96	$Y_1 = -9.2543 + 0.0050 X + 0.1386 Y + 0.1599 Z$	0.81	8
		$Y_2 = -0.6348 + 0.0178 X - 0.00001 X^2$	0.80	12
	Spring, 97	$\ln Y_1 = -0.0213 + 0.4876 \ln X - 1.1104 \ln Y + 0.6653 \ln Z$	0.68	14
		$Y_2 = -1.3144 + 0.0184 X - 0.000008 X^2$	0.76	12
	Summer, 97	$Y_1 = 18.113 - 0.0015 X + 0.3817 Y + 0.2686 Z$	0.71	7
		$Y_2 = 0.2637 + 0.0186 X - 0.00001 X^2$	0.74	12
<i>Platanus occidentalis</i>	Fall, 95	$\ln Y_1 = -9.3495 + 0.8514 \ln X - 0.5648 \ln Y + 1.9917 \ln Z$	0.71	12
		$Y_2 = -0.4350 + 0.0212 X - 0.00001 X^2$	0.80	16
	Spring, 96	$\ln Y_1 = -0.3717 + 0.8652 \ln X - 1.5480 \ln Y + 0.5200 \ln Z$	0.72	12
		$Y_2 = -1.6734 + 0.0208 X - 0.000009 X^2$	0.93	12
	Summer, 96	$\ln Y_1 = 14.147 + 0.7849 \ln X - 3.7734 \ln Y - 0.7933 \ln Z$	0.89	8
		$Y_2 = -0.1012 + 0.0322 X - 0.00002 X^2$	0.65	24
	Fall, 96	$\ln Y_1 = -7.2415 + 0.5474 \ln X - 0.5052 \ln Y + 1.9198 \ln Z$	0.92	8
		$Y_2 = -0.2781 + 0.0206 X - 0.00001 X^2$	0.77	12
	Spring, 97	$\ln Y_1 = -0.3717 + 0.8652 \ln X - 1.5480 \ln Y + 0.5200 \ln Z$	0.72	12
		$Y_2 = -1.6734 + 0.0208 X - 0.000009 X^2$	0.93	12
	Summer, 97	$\ln Y_1 = -24.813 + 0.3076 \ln X + 1.9902 \ln Y + 4.3409 \ln Z$	0.88	8
		$Y_2 = -0.5526 + 0.0244 X - 0.00001 X^2$	0.72	12
<i>Zelkova serrata</i>	Fall, 95	$\ln Y_1 = -5.8197 + 0.5553 \ln X - 0.8331 \ln Y + 1.6643 \ln Z$	0.72	11
		$Y_2 = -1.1170 + 0.0204 X - 0.00001 X^2$	0.72	17
	Spring, 96	$Y_1 = 21.628 + 0.0031 X - 0.5553 Y - 0.0366 Z$	0.75	8
		$Y_2 = -0.2134 + 0.0236 X - 0.00002 X^2$	0.72	11
	Summer, 96	$\ln Y_1 = -21.404 + 0.5624 \ln X + 1.7967 \ln Y + 3.4804 \ln Z$	0.74	8
		$Y_2 = -0.2370 + 0.0136 X - 0.000004 X^2$	0.70	12
	Fall, 96	$\ln Y_1 = -6.8975 + 0.4961 \ln X - 0.9810 \ln Y + 2.1197 \ln Z$	0.96	8
		$Y_2 = -0.1185 + 0.0101 X - 0.000005 X^2$	0.69	12
	Spring, 97	$\ln Y_1 = -1.7175 + 0.3741 \ln X - 0.7519 \ln Y + 1.0355 \ln Z$	0.83	8
		$Y_2 = -0.9604 + 0.0149 X - 0.000006 X^2$	0.80	12
	Summer, 97	$\ln Y_1 = -21.404 + 0.5624 \ln X + 1.7967 \ln Y + 3.4804 \ln Z$	0.74	8
		$Y_2 = -0.3691 + 0.0174 X - 0.000008 X^2$	0.78	12
<i>Acer palmatum</i>	Fall, 95	$\ln Y_1 = -4.5485 + 0.5537 \ln X - 0.7562 \ln Y + 1.3636 \ln Z$	0.81	12
		$Y_2 = 0.3274 + 0.0149 X - 0.000008 X^2$	0.81	17
	Spring, 96	$\ln Y_1 = 4.5078 + 0.5175 \ln X - 1.8680 \ln Y - 0.0466 \ln Z$	0.79	14
		$Y_2 = -0.5025 + 0.0089 X - 0.000004 X^2$	0.67	23
	Summer, 96	$\ln Y_1 = 0.5363 + 0.3009 \ln X - 0.9776 \ln Y + 0.6479 \ln Z$	0.67	14
		$Y_2 = -0.4767 + 0.0165 X - 0.00008 X^2$	0.73	12
	Fall, 96	$\ln Y_1 = -6.9396 + 0.5347 \ln X - 0.4574 \ln Y + 1.7404 \ln Z$	0.98	8
		$Y_2 = -0.0395 + 0.0100 X - 0.000004 X^2$	0.80	12
	Spring, 97	$\ln Y_1 = 4.5078 + 0.5175 \ln X - 1.8680 \ln Y - 0.0466 \ln Z$	0.79	14
		$Y_2 = -1.1848 + 0.0125 X - 0.000006 X^2$	0.84	12
	Summer, 97	$\ln Y_1 = -5.5501 + 0.3111 \ln X - 0.7132 \ln Y + 1.8644 \ln Z$	0.74	8
		$Y_2 = -0.8750 + 0.0149 X - 0.000007 X^2$	0.75	12

Note: * Spring: May and June, Summer: July and August, Fall: September and October.

** Y₁: Equation to estimate CO₂ uptake (umol/m²/s), Y₂: Equation to estimate both uptake and evolution of CO₂ (umol/m²/s), X: Photon flux density (umol/m²/s), Y: Air temperature (°C), Z: Humidity (%).

별 CO₂ 흡수량은 이들 두 회귀식의 적용결과를 평균하여 산출되었다. 제시된 회귀식 모두는 5% 수준에서 상관계수의 유의성이 인정된 것들이다. 회귀식들의 R₂은 대부분 0.70이상, 최대 0.98로서 그들의 적합도가 대체로 양호한 것으로 해석된다. CO₂ 흡수는 광도, 온도, 습도 등 3가지 인자들과의 비선형관계하에서 증감되었다. CO₂ 흡수 및 방출은 주로 광도에 의해 좌우되었으나, 이 역시 단순한 선형관계가 아닌 비선형관계를 나타내었다.

Table 5는 상기 회귀식들을 적용하여 각 측정수목의 단위엽면적당 일별 및 월별 순 CO₂ 흡수량을 산정한 2개년 평균치들을 나타내 준다. 주간의 단위시간당 평균 CO₂ 흡수율은 수종 및 계절에 따라 2.1-12.3 mg/dm²/h 이었고, 야간의 단위시간당 평균 CO₂ 방출율(호흡율)은 수종 및 계절별 큰 차이없이 1.0-2.1 mg/dm²/h이었다. 주간의 CO₂ 흡수율은 대체로 하루 중 오전동안의 측정시에 최대를 나타냈다. 대개 인공환경조건하에서 삼림지 낙엽활엽수종들의 CO₂ 교환율을 측정한 과거 20년 동안의 연구들에 의하면(Ceulemans and Saugier, 1991), 특정 환경조건하(광포화, 20-25℃, 330 ppm CO₂)에서의 단엽(單葉)에 의한 CO₂ 흡수량은 2-16 mg/dm²/h 이었고, 20-25℃하에서의 암호흡율은 0.4-1.3 mg/dm²/h이었다. 본 연구대상수목들의 CO₂ 교환율은 그들이 도시수목들이고 자연성장환경하에서의 측정치들을 토대로 산정된 수관전체 잎들의 평균치라는 점에서 직접 비교는 부적절하나, 과거 연구들의 결과보다 CO₂ 흡수율은 약간 더 낮고 암호흡율은 더 높은 것으로 분석된다.

수목들의 일별 및 월별 단위엽면적당 순 CO₂ 흡수량(주간 흡수량에서 야간 호흡량을 제감한 양)은 대체로 여름철(7, 8월)에 가장 많았고 가을철에 가장 적었다. 여름철 매일 및 매월의 순 CO₂ 흡수량은 은행나무가 각각 13-14 g/m² 및 260-310 g/m²로서 가장 많았고, 단풍나무가 각각 약 3 g/m² 및 60 g/m²로서 가장 적었다. 전 성장기간에 걸쳐 타 수종

들에 비해 가장 적은 광량을 받고 있었던 서남측 플라타너스는 동북측에 식재된 동일종 수목보다 봄(5, 6월)과 가을에 평균 약 33%, 그리고 태양고도가 높은 여름엔 12% 낮은 순 CO₂ 흡수량을 보였다. 이는 곧 광량이 CO₂ 흡수를 좌우하는 주요 환경인자라는 것을 대변한다. 한편, 동남 및 서북측의 두 은행나무는 플라타너스의 경우처럼 CO₂ 흡수량에 있어 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과들은 도시내 조경수들의 대기 CO₂ 흡수를 증진시키는 측면에서 도로, 건축 및 식재계획의 부분적인 지침을 함축한다.

4. 수종별 엽면적

단엽당 평균엽면적은 은행나무가 24.6 ± 0.7(표준오차)cm²(n=220), 단풍나무가 25.5 ± 0.6cm²(n=180), 그리고 느티나무가 27.6 ± 0.7cm²(n=180)로서 이들 수종간 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 플라타너스의 경우는 356.3 ± 13.7cm²(n=212)로서 전기한 3개 수종들보다 약 14배나 컸다. 대부분의 신엽들이 생장단계에 있는 5월의 평균엽면적은 여름 그것의 26.7%(측정대상수종들 평균치)에 해당하는 것으로 나타났다. 잎 30개당 평균엽중은 단풍나무 4.7 ± 0.4g(n=10), 느티나무 5.1 ± 0.7g(n=10), 은행나무 5.9 ± 0.3g(n=11), 플라타너스 43.4 ± 4.2g(n=11) 등이었다.

Table 6은 수종별 수목체체의 총엽면적을 추정하는 독립변수가 다른 두 종류의 회귀식들 및 R²과 그들이 유도된 직경급 범위를 보여 준다. 표본추출된 수목들의 흉고직경 범위는 수종에 따라 상이하나 최소 5.8cm에서 최대 57.5cm까지 분포하였다. 모든 회귀식들의 R²은 최소 0.70, 최대 0.96으로서 그들의 적합도가 비교적 높음을 뒷바침해 준다.

5. 가지의 호흡량

Table 7은 수종별 가지의 여름과 가을철 단

Table 5. Daily and monthly rates of net CO₂ uptake per unit leaf area by leaves of urban landscape trees averaged for two years from Sep., 1995 to Aug., 1997

Species	Month	Hourly exchange*		Net uptake (g/m ²)	
		Uptake	Evolution	Daily	Monthly
<i>Ginkgo biloba</i> - SE	May	4.3	2.1	3.9	75.3
	Jun.	4.2	2.1	4.1	83.5
	Jul.	10.9	2.1	13.2	264.1
	Aug.	11.2	2.1	12.9	275.9
	Sep.	4.8	1.7	3.7	100.4
	Oct.	2.9	1.7	1.1	19.3
<i>Ginkgo biloba</i> - NW	May	5.4	2.1	5.4	106.4
	Jun.	4.9	2.1	5.0	102.4
	Jul.	10.9	2.1	13.1	262.2
	Aug.	12.3	2.1	14.4	307.6
	Sep.	4.6	1.7	3.6	95.9
	Oct.	3.0	1.7	1.2	21.0
<i>Platanus occidentalis</i> - SW	May	5.1	1.9	5.2	109.6
	Jun.	3.2	1.9	2.9	56.5
	Jul.	6.2	1.6	7.1	136.3
	Aug.	6.0	1.6	6.4	135.9
	Sep.	2.9	1.0	2.3	62.8
	Oct.	2.1	1.0	1.0	18.7
<i>Platanus occidentalis</i> - NE	May	6.6	1.9	7.3	148.0
	Jun.	4.1	1.9	4.2	85.2
	Jul.	7.1	1.6	8.4	161.9
	Aug.	6.4	1.6	6.9	146.4
	Sep.	3.7	1.0	3.3	88.6
	Oct.	2.8	1.0	1.8	32.9
<i>Zelkova serrata</i>	May	6.9	1.4	8.3	168.4
	Jun.	6.0	1.4	7.5	152.6
	Jul.	7.0	1.3	8.5	172.2
	Aug.	5.6	1.3	6.2	133.5
	Sep.	3.2	1.2	2.4	65.1
	Oct.	2.7	1.2	1.4	25.7
<i>Acer palmatum</i>	May	2.7	1.5	2.3	44.0
	Jun.	2.2	1.5	1.8	35.5
	Jul.	3.5	1.9	3.0	60.6
	Aug.	3.5	1.9	2.8	60.4
	Sep.	4.1	1.2	3.5	95.6
	Oct.	2.7	1.2	1.5	27.5

Note: * Unit: mg/dm²/h, Uptake: Net photosynthesis, Evolution: Nocturnal respiration.

Table 6. Regression equations for each species generated to calculate total leaf area of a urban landscape tree

Species	N	DBH (cm)	Equations*	R ²
<i>Ginkgo biloba</i>	20	6.0-30.7	lnLA=-2.0430+2.3359 lnDBH	0.94
			lnLA=1.2599+1.2303 lnCV	0.70
<i>Platanus occidentalis</i>	20	10.1-57.5	LA=32.604+0.0204 H ² CV	0.76
			LA=9.6690+2.2464 CV	0.71
<i>Zelkova serrata</i>	20	5.8-34.2	lnLA=-0.5771+2.1456 lnDBH	0.96
			lnLA=2.3594+0.8331 lnCV	0.94
<i>Acer palmatum</i>	19	6.7-27.0	lnLA=-0.4617+1.8613 lnDBH	0.93
			lnLA=1.7525+0.8717 lnCV	0.73
Above all species	79	5.8-57.5	LA=22.001+1.4570 DBH+3.1479 CV	0.84
			LA=45.574+3.2404 CV	0.84

Note: * LA: Leaf area (m²), CV: Crown volume (m³), H: Tree height (m).

Table 7. Respiration rates of branches for each landscape tree species during summer and fall seasons*

Season	Species	Diameter (cm)	Dry weight (g)	Temperature (°C)	Respiration (mgCO ₂ /g/h)	N
Summer	<i>Ginkgo biloba</i>	1.1-5.8	2.0-37.8	34.6±0.3	0.287±0.051	17
	<i>Platanus occidentalis</i>	0.8-9.9	2.1-48.8	32.2±1.2	0.196±0.055	21
	<i>Zelkova serrata</i>	0.9-6.2	2.5-60.9	33.3±0.2	0.240±0.032	18
	<i>Acer palmatum</i>	0.9-6.6	2.4-52.3	30.8±0.3	0.174±0.029	17
	Total	0.8-9.9	2.0-60.9	32.7±0.5	0.223±0.021	73
Fall	<i>Ginkgo biloba</i>	1.2-7.1	3.0-46.1	19.6±0.6	0.200±0.095	16
	<i>Platanus occidentalis</i>	1.4-6.4	5.2-54.6	20.0±0.4	0.162±0.024	10
	<i>Zelkova serrata</i>	1.0-6.7	4.0-46.3	19.9±0.3	0.132±0.034	10
	<i>Acer palmatum</i>	1.0-7.6	3.3-45.4	22.8±0.3	0.116±0.022	10
	Total	1.0-7.6	3.0-54.6	20.4±0.3	0.159±0.039	46

Note: * The figures for temperature and respiration indicate mean ± standard error.

위시간 및 단위중량당 호흡량, 측정시의 온도 등을 요약한 것이다. 가지의 여름철 호흡량은 전 수종 평균 0.22 ± 0.02(표준오차) mgCO₂/g/h이었고, 가을철의 경우는 그보다 약 30% 적은 0.16 ± 0.04 mgCO₂/g/h이었다. 수종별 가지의 호흡량은 양 계절 모두 은행나무가 가장 많았고 단풍나무가 가장 적었다. 측정시 평균온도는 여름의 경우에 32.7°C, 그리고 가을엔 20.4°C이었다. 표본가지의 직경 범위는 수종에 따라 차이가 있으나 최소 약

1cm, 최대 10cm이었다. 기존의 연구에 의하면(한상섭 등, 1994), 18°C의 제어된 온도하에서 측정된 3-11년생 소나무의 가지호흡량은 0.05-0.53 mgCO₂/g/h인 것으로 보고된다. 본 연구대상수종들의 가지호흡량은 그 범위의 중간(여름철)내지 중하위(가을철)에 해당된다. Table 8은 수종별 수목개체의 총가지중량을 추정하는 회귀식과 R²을 나타낸 것이다. 회귀식들의 R²은 수종에 따라 0.71내지 0.95로서 그들의 적합도가 높은 것으로 판단된다.

Table 8. Regression equations for each species generated to calculate total branch weight of a urban landscape tree

Species	Equations*	R ²	N	DBH (cm)
<i>Ginkgo biloba</i>	$\ln DW = -4.5072 + 2.5136 \ln DBH$	0.95	20	6.0-30.7
<i>Platanus occidentalis</i>	$DW = 3.9546 + 0.0030 H^2 CV$	0.71	20	10.1-57.5
<i>Zelkova serrata</i>	$\ln DW = -2.2997 + 1.9256 \ln DBH$	0.93	20	5.8-34.2
<i>Acer palmatum</i>	$\ln DW = -2.1744 + 1.7294 \ln DBH$	0.89	19	6.7-27.0
Above all species	$DW = 8.3667 + 0.2810 CV$	0.74	79	5.8-57.5

Note: * DW: Dry weight (kg), H: Tree height (m), CV: Crown volume (m³).

6. 연간 전정량

Table 9는 은행나무와 플라타너스 측정개체들의 흉고직경, 수고, 수관폭, 전정량 등의 평균치를 보여 준다. 은행나무 개체들의 흉고직경은 평균 약 22cm, 수고는 9m, 수관폭은 4m, 수관체적은 39m³이었고, 그들의 평균전정량은 11.4 ± 0.8(표준오차)kg이었다. 플라타너스 개체들의 흉고직경은 평균 약 26cm, 수고는 10m, 수관폭은 6m, 수관체적은 81m³이었으며, 그들의 평균전정량은 34.9 ± 2.8kg이었다. 플라타너스의 평균수관체적은 은행나무보다 약 2배 컸고, 플라타너스의 평균전정량도 은행나무보다 3배 많았다. 수종별로 유도된 전정량 회귀식들은 그 적합도가 낮아 두 수종 모두 (n=81)를 대상으로 한 전정량(DW: kg) 회귀식의 산출 결과, 수관폭(CW)과 수고(H)를 독립변수로 한 회귀식 ($DW = -61.45 + 6.1429 CW + 5.5252 H$, 수관폭 범위: 2.8-8.1m, 수고 범위: 6.7-14.0m)이 R²=0.64로서 가장 적합도

가 높은 것으로 나타났다.

7. 연간 순탄소흡수량

Table 10은 동화기관에 의한 순탄소흡수량에서 비동화기관의 호흡과 전정에 의한 탄소방출량을 제감한 수목개체당 연간 순탄소흡수량을 나타낸다. 동화기관에 의한 연간 순탄소흡수량은 단위엽면적당 CO₂의 흡수능과 수관체적의 크기에 따라 수목별로 현저한 차이가 있었으며, 서북측 은행나무와 느티나무가 각각 약 32kg 및 30kg으로서 가장 많았다. 이들 수목보다 수관체적이 훨씬 적은 플라타너스의 동화기관에 의한 연간 순탄소흡수량은 약 6-7kg에 불과하였다.

비동화기관의 연간 호흡량은 동화기관에 의한 순탄소흡수량의 최소 약 38%인 11kg(느티나무)에서 최대 85%인 13kg(동남측 은행나무)까지 수목들에 따라 다양하였다. 전정에 의한 은행나무와 플라타너스의 연간 탄소방출

Table 9. Mean pruned biomass and dimensions of street landscape trees sampled at Chuncheon in both 1996 and 1997*

Species	DW(kg)**	DBH(cm)	H(m)	CW(m)	CV(m ³)	N
<i>Ginkgo biloba</i>	11.4 ± 0.8	22.4	9.0	4.4	39.2	41
<i>Platanus occidentalis</i>	34.9 ± 2.8	26.2	10.3	5.8	81.3	40

Note: * DW: Dry weight, H: Tree height, CW: Crown width, CV: Crown volume.

** Mean ± standard error.

Table 10. Annual net carbon uptake by urban landscape trees*

Species	Foliar net uptake	Woody respiration	Pruning	Annual net uptake
<i>Ginkgo biloba</i> -SE	15.0	12.7	1.2	1.1
-NW	32.2	15.7	5.2	11.3
<i>Platanus occidentalis</i> -SW	5.6	2.9	2.2	0.5
-NE	6.6	3.5	3.7	-0.6
<i>Zelkova serrata</i>	30.4	11.4	0	19.0
<i>Acer palmatum</i>	10.1	6.6	0	3.5

Note: * Unit: kg of carbon per tree.

량은 수목들에 따라 1-5kg인 것으로 산정되었다. 이 산정치는 전기한 전정량회귀식에 근거한 것으로서, 실측 평균치인 은행나무 5.7kg 및 플라타너스 17.5kg보다 적은 양이다. 그 이유는 이들 수목의 수고, 수관폭 등이 실측된 개체들의 평균 크기보다 작기 때문인 것으로 해석된다. 여기에서의 전정에 기인된 연간 탄소방출이란 전정된 모든 가지들의 소각으로부터 흡수된 탄소량을 해마다 다시 대기로 방출하는 결과를 가정한 것이다.

상기한 호흡과 전정에 의한 탄소방출량을 제감한 수목개체당 연간 순탄소흡수량은 전정되지 않은 느티나무가 19.0kg으로서 가장 많았고, 단위엽면적당 CO₂ 흡수량이 상대적으로 적었던 단풍나무의 경우는 3.5kg이었다. 전정되는 은행나무와 플라타너스의 연간 순탄소흡수량은 수관체적이 비교적 큰 서북측 은행나무의 11.3kg을 제외하곤 약 1kg에 불과하였다. 그러나, 동북측 플라타너스는 동화기관의 탄소흡수량에 비해 비동화기관의 호흡과 전정에 의한 탄소방출량이 오히려 0.6kg 더 많았다. 이와 같이, 반복되는 심한 전정은 줄기, 뿌리 등 비동화기관의 양에 비해, 해마다 누적해 나갈 수 있는 수관체적과 엽량을 상대적으로 축소시키는 수목성장의 불균형을 초래하고, 결국 생장기간동안 흡수할 대기탄소의 양을 감소시키는 것으로 분석된다.

개솔린 10리터 소비에 의한 탄소배출량은 약 6.0kg이며(Akbari et al., 1989), 전기 10kWh 소비에 의한 탄소배출량은 2.3kg이

다(DeCicco et al., 1990). 본 연구대상의 느티나무 한 그루는 해마다 약 32리터의 개솔린 소비, 또는 83kWh의 전기소비에 의한 탄소배출량을 상쇄시키는 역할을 한다. 자동차는 주행 10km당 약 0.6kg의 탄소를 대기에 배출한다(Citizens Fund, 1992). 느티나무 한 개체는 약 317km의 자동차 운행으로부터 배출되는 탄소량을 해마다 흡수하는 셈이다.

Table 11은 도시조경수의 수종별 연간 순탄소흡수량을 추정하는 방정식들을 요약한 것이다. 그들의 연간 순탄소흡수량 산정식은 다음과 같은 수리에 의해 유도되었다.

$$\text{수목의 연간 순탄소흡수량} = (\text{가을 총엽면적의 산정회귀식} \times \text{단위엽면적당 연간탄소흡수량} \times \text{월별 수관체적 변화를 고려한 보정계수}) - (\text{총가지중량 산정회귀식} \times \text{단위가지중량당 비동화기관의 연간호흡량}) - (\text{연간전정량 산정회귀식} \times 0.5)$$

은행나무의 예를 들어 설명하면, 그 수식의 0.2338은 단위엽면적당 연간탄소흡수량이며, 0.5769는 월별 수관체적의 변화를 고려한 탄소흡수량 산정 대신, 여름 혹은 가을에 측정된 흉고직경을 독립변수로 하는 엽면적회귀식의 적용으로부터 발생될 오차를 보정하는 계수이다. 그리고, 0.5742는 단위가지중량당 비동화기관의 연간호흡량이며, 0.5는 전정 건중량의 탄소량 전환계수이다.

Table 5로부터 수목별 잎들에 의한 단위엽면적당 연간 순탄소흡수량을 산정하면, 동남 및 서북측에 식재된 두 은행나무는 각각

Table 11. Equations for each species generated to calculate annual net carbon uptake (kg) of a urban landscape tree

Species	Equations*
<i>Ginkgo biloba</i>	$(e^{-2.0430+2.3359 \ln DBH} x 0.2338 x 0.5769) - (e^{-4.5072+2.5136 \ln DBH} x 0.5742)$ $- ((-61.450+6.1429 CW+5.5252 H) x 0.5)$
<i>Platanus occidentalis</i>	$((32.604+0.0204 H^2 CV) x 0.1613 x 0.6640) - ((3.9546+0.003 H^2 CV) x 0.4430)$ $- ((-61.450+6.1429 CW+5.5252 H) x 0.5)$
<i>Zelkova serrata</i>	$(e^{-0.5771+2.1456 \ln DBH} x 0.1957 x 0.7825) - (e^{-2.2997+1.9256 \ln DBH} x 0.5877)$
<i>Acer palmatum</i>	$(e^{-0.4617+1.8613 \ln DBH} x 0.0883 x 1.0202) - (e^{-2.1744+1.7294 \ln DBH} x 0.4748)$
Other spp. -Pruned	$((22.001+1.4570 DBH+3.1479 CV) x 0.1698 x 0.6205)$ $- ((8.3667+0.2810 CV) x 0.4527) - ((-61.450+6.1429 CW+5.5252 H) x 0.5)$
-Not pruned	$((22.001+1.4570 DBH+3.1479 CV) x 0.1698$ $x 0.9014) - ((8.3667+0.2810 CV) x 0.6304)$

Note: * Unit of DBH: cm, CW: Crown width (m), H: Tree height (m), CV: Crown volume (m³).

223.3g (818.7gCO₂) 및 244.3g (895.6gCO₂) 이었다. 서남 및 동북측에 식재된 두 플라타너스의 경우는 각각 141.8g (519.8gCO₂) 및 180.8g (663.1gCO₂) 이었고, 느티나무와 단풍나무의 경우는 각각 195.7g (717.6gCO₂) 및 88.3g (323.6gCO₂) 이었다. Table 11에서, 은행나무와 플라타너스의 단위엽면적당 연간탄소흡수량 계수들은 수종별 연구대상수목 두 그룹의 평균치이다.

엽면적 보정계수는 전정되는 은행나무 (0.5769)와 플라타너스 (0.6640)가 전정되지 않은 느티나무 (0.7825)와 단풍나무 (1.0202)보다 적은 수치를 보였다. 다시 말하면, 은행나무와 플라타너스는 월별 수관체적의 변화를 토대로 한 연간 탄소흡수량의 산정결과와, 가을에 측정된 흉고직경, 수고 등을 독립변수로 하는 엽면적회귀식에 근거한 그 산정간에 큰 차이를 나타낸 것이다. 이는 전정의 영향을 반영하는 것으로서, 흉고직경이나 수고의 크기에 비해 상대적으로 적은 수관체적 및 총엽면적의 불균형(특히, 생장기간 전반기)에 기인된 결과라고 사료된다. 단풍나무의 경우 전자와 후자에 의한 연간 탄소흡수량 산정에 있어 별 차이를 보이지 않았다. 은행나무와 플라타너스의 엽면적 보정계수들 역시 수종별 연구대상수목 두 개체의 평균치이다.

Table 11에 제시된 기타 수종들의 연간 순탄소흡수량 산정식은 은행나무, 플라타너스, 느티나무 및 단풍나무 4개 수종들을 종합하여 유도된 것이다. 이를 다시 전정된 수목과 전정되지 않은 수목을 위한 수식들로 구분하여 제시하였다. 그들 산정식에서 단위엽면적당 연간탄소흡수량 계수는 4개 수종들의 평균치이다. 엽면적 보정계수는 전정된 수목의 경우 은행나무와 플라타너스, 그리고 전정되지 않은 수목의 경우 느티나무와 단풍나무의 평균치들이다. 기타 수종들을 위한 그 산정식은 상기한 4개 수종들의 도시내 낙엽활엽수종들의 연간 순탄소흡수량을 추정하는데 활용될 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 연구는 적외선개스분석기에 의한 CO₂ 교환율의 측정을 통해, 도시의 주요 조경수종별 탄소흡수량을 추정하는 방정식들을 제시하고, 수목개체들의 연간 순탄소흡수를 계량화하였다. 도시수목들의 연간 순탄소흡수량은 수종별 광합성능, 생장기간중의 수관광량조건, 전정량 및 엽면적의 다소 등에 의해 현저한 차이가 있었다. 동화기관에 의한 단위엽면적당 연간 순탄소흡수량은 연구대상수종들 중 은행나무가

223.3-244.3g으로서 가장 많았고, 단풍나무가 88.3g으로서 가장 적었다. 단위엽면적당 순흡수량은 대체로 여름철에 가장 많았으며, 수종간 순흡수량의 차이도 그 계절에 뚜렷하였다. 인접한 건물에 의해 일조방해를 받은 서남측 플라타너스는 동북측에 식재된 동일종 수목보다 성장기간 동안 훨씬 적은 단위엽면적당 순흡수량을 보였다.

비동화기관의 호흡과 전정에 의한 탄소방출량을 제감한 수목개체당 연간 순탄소흡수량은 전정되지 않은 느티나무가 19.0kg으로서 가장 많았다. 전정의 영향으로 수관체적이 적은 은행나무와 플라타너스의 경우는 약 1kg에 불과하였으며, 오히려 동화기관의 연간 탄소흡수량에 비해 전정과 호흡에 의한 연간 탄소방출량이 더 많은 수목도 있었다. 본 연구대상의 느티나무 한 그루는 해마다 약 32리터의 개솔린 소비, 또는 83kWh의 전기소비에 의한 탄소배출량을 상쇄시키는 기능을 나타냈다.

도시 조경수들의 CO₂ 흡수량을 증진하기 위한 전략은 CO₂ 흡수능이 높은 수종의 선정식재, 동서방향보다는 남북방향의 도로배치에 의한 가로수의 일조 확보, 건물복측엔 내음성 수종의 식재, 가공선의 지하매설과 전정의 최소화 등을 포함한다. 본 연구에서는 단지 낙엽활엽수종들만의 연간 순탄소흡수량 산정식들을 제시하였다. 향후 연구는 상록침엽수종의 연간 CO₂ 교환율도 측정하여, 낙엽활엽수종의 경우와 비교하고 도시생태계에서의 수목과 CO₂ 순환에 대한 이해를 도모해야 할 것이다.

인용문헌

1. 송철영, 장관순, 박관수, 이승우(1997) "신갈나무와 굴참나무 천연림의 탄소 고정량 분석", 한국임학회지, 86(1): 35-45.
2. 이종석, 김일중, 심우경, 이석래(1979) "우리나라의 조경식물 이용경향에 관한 연구", 한국조경학회지, 13: 1-11.
3. 조현길(1997) "전정한 도시생태계를 위한 녹지계획 및 관리", 환경생태학회 97년도 학술논문발표회지: 18-22.
4. 조현길, 윤영환, 이기의(1995) "도시녹지에 의한 대기 CO₂의 흡수", 한국조경학회지, 23(3): 80-93.
5. 조현길, 이기의, 윤영환, 서육하(1998a) "강원도 일부 도시들의 토지이용 및 녹지구조", 한국조경학회지, 25(4): 171-183.
6. 조현길, 이경재, 권전오(1998b) "서울시의 토지이용 및 녹지구조", 환경생태학회지, 12(1): 30-41.
7. 한상섭, 장준근, 김선희(1994) "강원도 소나무림의 특성에 관한 종합적 연구(II): 유령림의 생장에 따른 구성호흡과 유지호흡", 한국임학회지, 83(2): 221-228.
8. 根岸賢一郎(1970) "樹木の非同化器官の呼吸", 日林誌, 52(11): 331-345.
9. 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.
10. Akbari, H., J. Huang, P. Martien, L. Rainer, A. Rosenfeld, and H. Taha (1989) "Saving energy and reducing atmospheric pollution by controlling summer heat islands", In Garbesi, K., H. Akbari, and P. Martien, eds., *Cooling Summer Heat Islands*, Vol. LBL-27872, Berkeley, CA: Lawrence Berkeley Laboratory. pp. 31-44.
11. Bernatzky, A. (1978) *Tree Ecology and Preservation*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
12. Ceulemans, R. J. and B. Saugier (1991) "Photosynthesis", In Raghavendra, A. S., ed., *Physiology of Trees*, New York: John Wiley & Sons. pp. 21-50.
13. 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.
14. Ciborowski, P. (1989) "Sources, sinks, trends, and opportunities", In Abrahamson, D. E., ed., *The Challenge of Global Warming*, Washington, D.C.: Island Press. pp. 213-230.
15. Citizens Fund (1992) *The Heat is On: America's CO₂ Polluters*, Research Report, Washington, D.C.: Citizens Fund.
16. DeCicco, J., J. Cook, D. Bolze, and J. Beyea (1990) *CO₂ Diet for a Greenhouse Planet: a Citizen's Guide for Slowing Global Warming*, New York: National Audubon Society.
17. Detwiller, R. and C. Hall (1987) "Tropical forests and the global carbon cycle", *Science*, 239: 42-47.
18. Etherington, J. R. (1982) *Environment and Plant Ecology*, New York: John Wiley & Sons.
19. Jo, H. K. and E. G. McPherson (1995) "Carbon storage and flux in urban residential greenspace", *Journal of Environmental*

- Management*, 45: 109-133.
20. Kramer, P. J. (1981) "Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production", *BioScience*, 31(1): 29-33.
 21. Lashof, D. A., and D. A. Tirpak (1991) *Policy Options for Stabilizing Global Climate*, Report to Congress, Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
 22. Nobel, P. S. (1983) *Biophysical Plant Physiology and Ecology*, San Francisco, CA: W.H. Freeman and Company.
 23. Nowak, D. J. (1993) "Atmospheric carbon reduction by urban trees", *Journal of Environmental Management*, 37: 207-217.
 24. Nowak, D. J. (1994) "Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest", In McPherson, E. G., 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: U.S.D.A. Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. pp. 83-94.
 25. Pingrey, D. W. (1976) "Forest products energy overview", In *Energy and the Wood Products Industry*, Madison, WI: Forest Products Research Society. pp. 1-14.
 26. Post, W. M., T. H. Peng, W. R. Emanuel, A. W. King, V. H. Dale, and D. L. DeAngelis (1990) "The global carbon cycle", *American Scientist*, 78: 310-326.
 27. 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, New York: U.S. Atomic Energy Commission. pp. 345-365.
 28. Rodhe, H. (1990) "A comparison of the contributions of various gases to the greenhouse effect", *Science*, 248: 1217-1219.
 29. Schneider, S. H. (1990) "The changing climate", In *Managing Planet Earth*, New York: W.H. Freeman and Company. pp. 25-36.
 30. Singh, M., R. Chaturvedi, and P. V. Sane (1996) "Diurnal and seasonal photosynthetic characteristics of *Populus deltoides* Marsh. leaves", *Photosynthetica*, 32(1): 11-21.