

# 도시 침엽수에 의한 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화<sup>1</sup>

-소나무와 잣나무를 대상으로-

조현길<sup>2</sup> · 안태원<sup>3</sup>

## Annual CO<sub>2</sub> Uptake and Atmospheric Purification by Urban Coniferous Trees<sup>1</sup>

-For *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*-

Hyun-Kil Jo<sup>2</sup>, Tae-Won Ahn<sup>3</sup>

### 요 약

본 연구의 목적은 도시에 식재된 두 침엽수종인 소나무와 잣나무 단목의 연간 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 흡수 및 O<sub>2</sub> 생산을 계량화하는 것이었다. 자연환경 조건하에서 운반형 적외선가스분석기로 연간 CO<sub>2</sub> 교환율을 측정하여 CO<sub>2</sub> 흡수 및 O<sub>2</sub> 생산량을, 그리고 CO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub> 또는 NO<sub>2</sub>간 흡수속도비를 적용하여 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 흡수량을 각각 산정하였다. 흉고직경을 독립변수로 단목의 생장에 따른 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화량을 추정하는 활용 용이한 방정식을 유도하였다. 연구대상 수목 중, 흉고직경 20cm인 잣나무는 연간 약 35kg의 CO<sub>2</sub>, 11g의 SO<sub>2</sub>, 19g의 NO<sub>2</sub>를 각각 흡수하였고 25kg의 O<sub>2</sub>를 생산하였다. 동일 직경의 소나무는 유도한 방정식을 적용하면, 연간 약 30kg의 CO<sub>2</sub>, 9g의 SO<sub>2</sub>, 15g의 NO<sub>2</sub>를 각각 흡수하였고 22kg의 O<sub>2</sub>를 생산하였다. 생장기간 중 단위엽면적당 CO<sub>2</sub> 흡수량은 잣나무가 소나무보다 적었으나, 단목의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화량은 총엽면적의 차이로 잣나무가 동일 직경의 소나무보다 많았다. 본 연구결과는 도시 침엽수의 연간 대기정화 가치를 용이하게 계량화하고 도시공간내 수목식재의 환경적 중요성을 홍보하는데 활용될 수 있다.

주요어 : SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 엽면적, 방정식

### ABSTRACT

The purpose of this study was to quantify annual CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> uptake and annual O<sub>2</sub> production per tree by *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* planted in urban settings. Annual CO<sub>2</sub> exchange rates were measured under natural conditions with a portable infrared gas analyzer to compute CO<sub>2</sub> uptake and O<sub>2</sub> production, and the deposition velocity ratio of CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> or NO<sub>2</sub> was applied to estimate SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> uptake. An equation for each species was generated to quantify easily annual CO<sub>2</sub> uptake and atmospheric purification by DBH

\* 이 논문은 1999년도 환경부의 환경기술개발사업 연구비에 의한 연구의 일부임

1 접수 4월 27일 Received on Apr. 27, 2001

2 강원대학교 건축·조경학부 Division of Architecture and Landscape Architecture, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea(jhk@cc.kangwon.ac.kr)

3 강원대학교 대학원 Graduate School, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

growth. Of tree specimens studied, a *Pinus koraiensis* tree with DBH of 20cm annually absorbed about 35kg CO<sub>2</sub>, 11g SO<sub>2</sub>, and 19g NO<sub>2</sub>, and also produced 25kg O<sub>2</sub>. A *Pinus densiflora* tree with the same DBH annually absorbed about 30kg CO<sub>2</sub>, 9g SO<sub>2</sub>, and 15g NO<sub>2</sub>, and also produced 22kg O<sub>2</sub>, based on the equation. Carbon dioxide uptake per unit leaf area by *Pinus koraiensis* was lower over the growing seasons than that of *Pinus densiflora*. However, annual CO<sub>2</sub> uptake and atmospheric purification per tree in the same diameter sizes were greater for the former than for the latter due to differences in total leaf area. The results from this study can be used to evaluate easily annual atmospheric purification value of open-grown urban coniferous trees, and to inform environmental importance of tree planting in urban spaces.

**KEY WORDS : SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, LEAF AREA, EQUATIONS**

## 서 론

수목은 광합성 과정에서 온실가스인 CO<sub>2</sub>를 비롯하여 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 등 가스상 오염물질을 흡수하여 그들의 대기농도를 낮추고, 인간의 호흡에 필요한 O<sub>2</sub>를 방출하면서 신선한 공기를 제공한다. 도시수목의 이러한 대기정화 역할은 과거 실험적, 생리적 등 다양한 각도에서 연구된 바 있다(이경재, 1993). 그러나, 기존 연구는 주로 특정시기에 엽 내의 오염물질 함량을 분석하거나 인공환경 조건하에서 단기간 동안 유목을 대상으로, 내공해성의 강약 여부를 파악하는 데 초점을 두었다. 자연환경 조건하에서 성목의 연간 생장기간에 걸친 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화량을 구명한 국내 연구는 흔치 않다. 다만 조현길과 조동하(1998)가 도시의 주요 낙엽성 조경수종을 대상으로 단목(單木) 레벨의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수를 계량화한 바 있다. 수목의 큰 수관체적과 긴 생장수명은 장기간에 걸친 자연상태하의 대기정화능 측정을 제한하였다고 볼 수 있다.

도시수목은 자연삼림환경이 아닌 도시환경에서 생장하며, 경합조건 차이, 관리투입 등으로 엽면적 축적을 비롯한 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화량이 삼림수목과는 다를 것이다. 소나무(*Pinus densiflora*)와 잣나무(*Pinus koraiensis*)는 도시에 식재되는 주요 조경수종의 일부이다. 이들 수종의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화 효과를 구명하는 것은 미흡한 도시 침엽수의 관련 정보를 확충하고 수목식재의 환경적 중요성을 홍보하는 데 일조할 수 있다. 본 연구의 목적은 상기한 두 침엽수종을 선정하여 생장에 따른 단목의 연간 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 흡수 및 O<sub>2</sub> 생산을 계량화하는 것이었다.

## 연구 방법

### 1. CO<sub>2</sub> 교환율 및 환경변수 측정

도시공원, 공공건물 식재대 등의 생장장소, 정상적 생장의 여부 및 정기적 반복측정의 용이성을 감안하여 춘천시에서 임의 표본추출한 수종별 3개체, 총 6개체를 대상으로, 1999~2000년 연중 CO<sub>2</sub> 교환율과 관련 환경변수를 측정하였다. 운반형 적외선가스 분석기(LI-COR LI-6400, Nebraska)를 이용하여, 엽의 CO<sub>2</sub> 흡수 및 방출(호흡)을 현지 자연조건하에서 3~11월의 생장기간 중 매월 중순에 측정하였다. 그 측정은 오전 8시경부터 오후 11시경까지 1시간 반(소나무) 또는 3시간(잣나무) 간격으로 매측정시 20반복으로 실시되었다. 측정대상의 엽은 월별 평균적 엽령에 해당하고 측정시간별 평균적 광량을 받는다고 판단된 것을 수관 중앙부에서 임의로 선정하였다.

표본추출한 6개 수목별로, CO<sub>2</sub> 교환율에 영향을 미치는 광량, 온도, 습도 등의 환경변수를 생장기간 중 매월 초, 중, 하순에 해당일 오전 8시경부터 익일 까지 24시간 동안 3시간 간격으로 측정하였다. 광량은 수관 중간부위의 외부와 내부 각각 8개 방향(동, 동남, 남, 서남, 서, 서북, 북 및 동북), 총 16개 지점에서 광량계(LI-COR LI-190SA, Nebraska)로 측정하여 수관 방향별 광량차를 반영하였다. 대기온도와 습도는 자기온습도계(HOBO H08-032-02, Massachusetts)를 이용하여 수관 주변부에서 측정하였다.

## 2. 엽면적 측정

단위엽면적당 CO<sub>2</sub> 교환을 측정치를 단목 총량으로 전환하기 위하여, Plant Canopy Analyzer(LI-COR LAI-2000, Nebraska)로 매월 중순 6개 대상수목의 엽면적지수를 측정하여 월별 엽면적 변화를 파악하였다. 그 측정은 직광에 의한 엽면적지수의 과소측정을 피할 수 있는 아침 및 저녁시간에 수관의 4방향에서 각각 8반복으로 실시되었다. 한편, 수종별로 흉고직경이 다양한 수목들을 약 30개체씩 표본추출하여, 9월에 개체별 엽면적지수를 동일한 방법으로 측정하였다. 흉고직경, 수관체적 등의 측정치를 독립변수로 하여 단목의 가을 총엽면적을 추정하는 가장 적합한 회귀식과 변수를 결정하였다.

## 3. 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 O<sub>2</sub> 생산량 산정

엽의 CO<sub>2</sub> 교환을 측정시 그에 영향하는 환경인자들을 적외선가스분석기로 자동측정하여, 환경변화에 따른 계절별 CO<sub>2</sub> 교환을 추정하는 회귀식을 산출하였다. 즉, 광량, 온도, 습도 등을 독립변수로 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 회귀식과 변수를 최종 결정하였다. 전기한 방법으로 매월 초, 중, 하순에 측정된 환경변수를 유도한 CO<sub>2</sub> 교환을 회귀식에 대입하여, 성장환경 조건을 반영한 월별 평균 단위시간 및 단위엽면적당 CO<sub>2</sub> 교환을 계량화하였다. 이 CO<sub>2</sub> 교환에 비가 내린 날을 제외한 해당 월의 일장 및 야장시간과 단목 엽면적을 곱하여 월별 CO<sub>2</sub> 흡수 및 방출 총량을 산정하였다.

성장기간의 월별 CO<sub>2</sub> 교환량을 적산하여 연간 CO<sub>2</sub> 교환량을 구하고, 이로부터 엽과 비동화기관의 호흡량을 제감하여 측정대상 수목의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량을 산정하였다. 비동화기관 중 가지의 호흡은 운반형 적외선가스분석기로 실측한 소나무의 계절별 단위중량당 가지호흡량(Jo and Ahn, 2001)과, 그리고 수종별 가지중량 연구결과(이경재와 박인협, 1987; 박인협과 이석면, 1990)를 조합하여 유도한 가지중량 추정식을 이용하여 계량화하였다. 즉, 단위중량당 호흡량에 회귀식에 의한 총가지중량과 해당 계절의 총시간을 곱하여 단목의 가지호흡량을 산출하였다. 줄기와 뿌리의 호흡량은 수목기관간 호흡량비(根岸賢一郎, 1970; Reichle *et al.*, 1973)를 근거로 가지호흡량에 각각 0.7 및 0.3을 곱하여 산정되었다. 수종별 성장에 따른 단목의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수를 계량화하는 활용 용이한 방정식을 아래와 같은 수리에 의해 유도하였다.

수목의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 = (가을 총엽면적 회귀식 × 단위엽면적당 연간 CO<sub>2</sub> 순흡수량 × 월별 엽면적 변화를 반영한 보정계수) - (총가지중량 회귀식 × 단위가지중량당 비동화기관의 연간 호흡량)

위에서, 가을 총엽면적의 산정 회귀식은 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량 산정식의 일반적 활용상 월별 엽면적 변화를 측정해야 하는 번거로움을 덜기 위하여 이용되었다. 그 대신, 6개 대상수목의 월별 엽면적 변화를 파악하여 산출한 연간 CO<sub>2</sub> 흡수량과의 평균차로부터 보정계수를 구하여 수정하였다. 수목의 연간 O<sub>2</sub> 생산량은 6mole의 CO<sub>2</sub>를 흡수하고 6mole의 O<sub>2</sub>를 방출하는 광합성 수식(Lieth, 1963)에 입각하여 연간 흡수한 CO<sub>2</sub>량에 0.7273을 곱하여 산정되었다.

## 4. 연간 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 흡수량 산정

수목에 의한 가스상 오염물질의 흡수는 엽의 기공을 통해 이루어지므로 CO<sub>2</sub> 흡수속도와 밀접한 관계가 있다. 아래의 수리와 같이, CO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub> 또는 NO<sub>2</sub> 간 흡수속도비(Hill, 1971)를 적용하여 수종별 성장에 따른 단목의 연간 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 흡수를 계량화하는 일반적 방정식을 마련하였다. 측정대상 수목에 의한 이들 오염물질의 흡수량 산정시, SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub>의 대기농도는 환경부(<http://www.me.go.kr/www/db/>)에서 제공한 춘천시의 1999~2000년 계절별 평균치를, 대기 CO<sub>2</sub> 농도는 CO<sub>2</sub> 교환을 측정시 적외선가스분석기로 실측한 계절별 평균치를 각각 이용하였다.

수목의 연간 SO<sub>2</sub> 또는 NO<sub>2</sub> 흡수량 = (가을 총엽면적 회귀식 × 단위엽면적당 연간 CO<sub>2</sub> 총흡수량 × 월별 엽면적 변화를 반영한 보정계수) × CO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub> 또는 NO<sub>2</sub>간 단위체적 및 농도당 중량의 흡수속도비 × (SO<sub>2</sub> 또는 NO<sub>2</sub>의 대기농도/CO<sub>2</sub>의 대기농도)

# 결과 및 고찰

## 1. 측정대상 수목의 성장환경

연중 CO<sub>2</sub> 교환을 및 관련 환경변수를 측정하기 위해 표본추출한 수목들의 흉고직경은 17~33cm, 수관체적은 24~132m<sup>3</sup>이었다(Table 1). 수관체적의 월별 평균 최대광량은 가을철에 가장 낮은 반면, 성장기간 중 7월에 가장 높아 건물남향 수목의 경우 1,280(갯나무)~1,660(소나무)μmol/m<sup>2</sup>/s이었다. 수관밀도를 반영하는 수관내부의 최소광량은 수종간

Table 1. Dimensions and growing places of trees for each species selected to measure CO<sub>2</sub> exchange rates and environmental parameters

| Species                 | Place      | DBH (cm) | Height (m) | Crown    |                         |
|-------------------------|------------|----------|------------|----------|-------------------------|
|                         |            |          |            | Width(m) | Volume(m <sup>3</sup> ) |
| <i>Pinus densiflora</i> | Building-S | 18.7     | 4.8        | 5.0      | 24.1                    |
|                         | Building-E | 21.8     | 8.3        | 6.0      | 28.7                    |
|                         | Park       | 22.6     | 6.8        | 6.1      | 48.2                    |
| <i>Pinus koraiensis</i> | Building-S | 20.0     | 10.5       | 5.2      | 47.2                    |
|                         | Building-W | 33.2     | 11.8       | 7.8      | 132.2                   |
|                         | Park       | 16.7     | 7.5        | 5.3      | 39.8                    |

큰 차이 없이 전생장기간에 걸쳐 최대광량의 3~7% 이었다. 수관주변 온도와 습도는 수종별 생장장소에 따라 생장기간 평균 각각 17~18℃, 58~63%인 것으로 나타났다. 대기 CO<sub>2</sub> 농도는 생장기간 평균 약 381ppm이었고 봄이나 가을보다 여름철에 더 낮았다.

2. 수관의 계절별 CO<sub>2</sub> 교환율

수관의 CO<sub>2</sub> 교환율은 수관을 형성하는 엽 전체에

의한 CO<sub>2</sub> 흡수와 방출을 나타내며, 그것은 수목의 광합성능 및 총엽면적뿐만 아니라 환경변수에 의해 영향을 받는다. Table 2는 환경변수를 적용하여 계절별 단위시간 및 단위엽면적당 각 수종의 CO<sub>2</sub> 교환율을 산정하는 회귀식을 보여 준다. 회귀식 모두는 F 검정 결과 통계적으로 유의하였고(P<0.01), r<sup>2</sup>은 최소 0.73, 최대 0.93으로서 적합도가 대체로 양호한 것으로 해석된다.

그들 회귀식을 이용하여 수관의 월별 CO<sub>2</sub> 교환율을 산정한 결과는 Table 3과 같다(수종별 3개 측정

Table 2. Regression equations for each species generated to estimate seasonal CO<sub>2</sub> exchange rates by leaves(μmol/m<sup>2</sup>/s)

| Species                 | Season* | Equation**  | r <sup>2</sup> | P      | n  |
|-------------------------|---------|---|----------------|--------|----|
| <i>Pinus densiflora</i> | Spring  | lnY <sub>1</sub> = -6.2053 + 0.6135 lnX + 0.1981 lnY + 0.8697 lnZ | 0.84           | <0.001 | 19 |
|                         |         | Y <sub>2</sub> = -0.4980 + 0.0139X - 6.45E - 6X <sup>2</sup>      | 0.78           | <0.001 | 25 |
|                         |         | lnY <sub>3</sub> = -4.1009 + 1.5598 lnY - 0.2878 lnZ              | 0.81           | 0.001  | 11 |
|                         | Summer  | lnY <sub>1</sub> = -2.8725 + 0.7746 lnX - 1.3427 lnY + 0.9405 lnZ | 0.73           | <0.001 | 20 |
|                         |         | Y <sub>2</sub> = -0.5780 + 0.0102X - 2.60E - 6X <sup>2</sup>      | 0.73           | <0.001 | 25 |
|                         |         | lnY <sub>3</sub> = -12.8075 + 2.9646 lnY + 0.6732 lnZ             | 0.84           | <0.001 | 12 |
|                         | Fall    | lnY <sub>1</sub> = -4.6206 + 0.6791 lnX + 0.0227 lnY + 0.5057 lnZ | 0.93           | <0.001 | 19 |
|                         |         | Y <sub>2</sub> = -0.2159 + 0.0182X - 7.37E - 6X <sup>2</sup>      | 0.74           | <0.001 | 25 |
|                         |         | lnY <sub>3</sub> = -4.3372 + 0.5898 lnY + 0.5561 lnZ              | 0.77           | 0.003  | 11 |
| <i>Pinus koraiensis</i> | Spring  | lnY <sub>1</sub> = -7.3630 + 0.3772 lnX + 1.0046 lnY + 0.8437 lnZ | 0.86           | 0.002  | 11 |
|                         |         | Y <sub>2</sub> = -0.2355 + 0.0131X - 1.03E - 5X <sup>2</sup>      | 0.79           | <0.001 | 16 |
|                         |         | lnY <sub>3</sub> = -3.4616 + 1.0240 lnY + 0.0465 lnZ              | 0.90           | <0.001 | 12 |
|                         | Summer  | lnY <sub>1</sub> = 12.3670 + 0.9819 lnX - 4.9510 lnY - 0.1795 lnZ | 0.81           | 0.003  | 12 |
|                         |         | Y <sub>2</sub> = -0.5758 + 0.0153X - 6.85E - 6X <sup>2</sup>      | 0.75           | <0.001 | 17 |
|                         |         | lnY <sub>3</sub> = 2.3450 + 0.0961 lnY - 0.7233 lnZ               | 0.85           | <0.001 | 11 |
|                         | Fall    | lnY <sub>1</sub> = -3.3107 + 0.3334 lnX + 0.3114 lnY + 0.4673 lnZ | 0.90           | <0.001 | 11 |
|                         |         | Y <sub>2</sub> = -0.0734 + 0.0093X - 3.02E - 6X <sup>2</sup>      | 0.85           | <0.001 | 16 |
|                         |         | lnY <sub>3</sub> = -0.1268 + 0.4810 lnY - 0.4863 lnZ              | 0.88           | <0.001 | 12 |

\* Spring: Mar. ~ May, Summer: Jun. ~ Aug., Fall: Sep. ~ Nov.

\*\* Y<sub>1</sub>: Uptake, Y<sub>2</sub>: Uptake and nocturnal release, Y<sub>3</sub>: Diurnal release, X: Photon flux density (μmol/m<sup>2</sup>/s), Y: Temperature(℃), Z: Humidity(%)

Table 3. Monthly CO<sub>2</sub> exchange rates at the crown level for each species (mg/dm<sup>2</sup>/h)

| Species                 | Month                   | Uptake | Release |           |     |
|-------------------------|-------------------------|--------|---------|-----------|-----|
|                         |                         |        | Diurnal | Nocturnal |     |
| <i>Pinus densiflora</i> | 3                       | 1.6    | 0.2     | 0.8       |     |
|                         | 4                       | 4.9    | 0.7     | 0.8       |     |
|                         | 5                       | 5.2    | 1.1     | 0.8       |     |
|                         | 6                       | 4.7    | 1.0     | 1.0       |     |
|                         | 7                       | 5.3    | 1.3     | 1.0       |     |
|                         | 8                       | 4.4    | 1.4     | 1.0       |     |
|                         | 9                       | 4.9    | 1.5     | 0.6       |     |
|                         | 10                      | 4.0    | 0.9     | 0.6       |     |
|                         | 11                      | 2.9    | 0.8     | 0.6       |     |
|                         | <i>Pinus koraiensis</i> | 3      | 1.7     | 0.4       | 0.5 |
|                         |                         | 4      | 2.7     | 1.0       | 0.5 |
| 5                       |                         | 3.6    | 1.4     | 0.5       |     |
| 6                       |                         | 4.0    | 1.3     | 0.8       |     |
| 7                       |                         | 4.2    | 1.1     | 0.8       |     |
| 8                       |                         | 4.1    | 1.2     | 0.8       |     |
| 9                       |                         | 4.0    | 0.9     | 0.4       |     |
| 10                      |                         | 3.1    | 0.8     | 0.4       |     |
| 11                      |                         | 2.7    | 0.6     | 0.4       |     |

수목의 평균치). 여기에서 CO<sub>2</sub> 흡수량은 Table 2에 제시된 Y<sub>1</sub> 및 Y<sub>2</sub>, 2개 회귀식의 적용결과를 평균하여 산출되었다. 수관의 CO<sub>2</sub> 교환율은 두 수종 모두 온도가 낮은 이른봄이나 늦가을보다는 여름철(6~8월)에 높은 경향을 나타내었다. 여름철 수관의 CO<sub>2</sub> 흡수량은 소나무가 단위시간 및 단위엽면적당 4.4~5.3mg/dm<sup>2</sup>/h, 잣나무가 4.0~4.2mg/dm<sup>2</sup>/h이었으며, 거의 모든 계절에 걸쳐 소나무가 잣나무보다 높은 흡수량을 나타냈다. 실제, 월별 일정한 시간간격으로 동일 환경조건하에서 측정한 수종간엽의 단위면적당 CO<sub>2</sub> 흡수량은 소나무가 잣나무보다 모든 계절에 더 많았다(P<0.01). 호흡을 통한 수관의 월별 CO<sub>2</sub> 방출량은 주간에 야간보다 약간 많은 경향을 보였으나 1.5mg/dm<sup>2</sup>/h 미만이었다. 2월 중 CO<sub>2</sub> 교환율은 극히 미미한 양이었으며, 따라서 겨울철엔 생리적으로 거의 휴면상태인 것으로 추정된다.

도시 낙엽수인 은행나무(*Ginkgo biloba*), 플라타너스(*Platanus occidentalis*) 및 느티나무(*Zelkova serrata*)에 의한 수관의 CO<sub>2</sub> 흡수량과 방출량은 7~8월에 각각 6~12mg/dm<sup>2</sup>/h, 1~2mg/dm<sup>2</sup>/h이었다(조현길과 조동하, 1998). 본 연구의 소나무 및 잣나무는 그들 낙엽수종에 비해 적은 CO<sub>2</sub> 흡수량을 나타냈으나 방출량은 유사하였다. Ceulemans와 Saugier(1991) 역시 상록침엽

수종의 광합성능은 낙엽활엽수종보다 낮음을 보고한 바 있다.

### 3. 단목의 총엽면적

Figure 1은 수종별 단목의 가을 총엽면적을 산정하는 회귀식과 생장에 따른 총엽면적의 변화를 보여

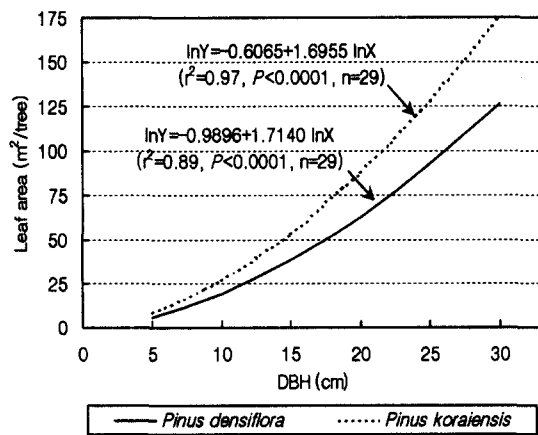


Figure 1. Trends of total leaf area per tree by DBH growth for each species

준다. 회귀식의 r<sup>2</sup>은 소나무 0.89, 잣나무 0.97로서 적합도가 높았고 양 회귀식 모두 통계적으로 유의하였다(P<0.0001). 표본추출한 수목들의 흉고직경은 소나무 5~29cm, 잣나무 5~33cm의 범위에 분포하였다. 단목의 총엽면적은 잣나무가 동일한 흉고직경의 소나무보다 약 1.4배 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 흉고직경 20cm인 소나무와 잣나무의 총엽면적은 각각 63m<sup>2</sup>, 88m<sup>2</sup>이었다.

#### 4. 단목의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화

단목의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 대기정화 효과는 흉고직경과 엽면적의 대소에 따라 증감하는 경향을 보였다. 총흡수량에서 동화 및 비동화기관 호흡량을 제외한 측정대상 수목의 연간 CO<sub>2</sub> 순흡수량은 Table 4와 같이, 직경크기에 따라 소나무 28~31kg/yr, 잣나무 27~69kg/yr이었다. 동화기관의 주야간 호흡량은 총흡수량의 약 32%(대상수목 평균)를, 그리고 비동화기관을 포함한 총호흡량은 총흡수량의 59%를 점유하였다. 총흡수량 대비 총호흡량비는 직경크기의 증가와 더불어 약간씩 커지는 경향을 나타냈다. 대상수목의 연간 O<sub>2</sub> 생산량은 직경크기에 따라 소나무 21~22kg/yr, 잣나무 19~50kg/yr이었다. 휘발유

1리터 소비에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 약 2.2kg이며(에너지관리공단, 1996), 시민 1인당 호흡에 필요한 산소량은 연간 약 270kg/yr이다(김기원, 1984). 본 연구대상의 흉고직경 20cm인 잣나무 단목은 해마다 16리터의 휘발유 소비로부터 배출되는 CO<sub>2</sub>량을 흡수하고, 또한 시민 1인이 해마다 필요로 하는 산소량의 10%를 생산하는 셈이었다.

한편, 대상수목의 연간 SO<sub>2</sub> 흡수량은 직경크기에 따라 소나무 8~11g/yr, 잣나무 8~26g/yr이었고, 연간 NO<sub>2</sub> 흡수량은 소나무 14~19g/yr, 잣나무 14~43g/yr이었다(Table 4 참조). 이들 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 흡수량은 춘천시의 계절별 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 대기농도를 적용하여 산출된 것으로서, 도시별 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 농도의 고저에 따라 흡수량엔 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 춘천시의 1999~2000년 생장기간 중 평균 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 대기농도는 각각 4.0ppb, 13.9ppb이었다.

Table 5는 연구결과를 토대로 수종별 생장에 따른 단목의 연간 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 흡수를 계량화하는 방정식을 요약한 것이다. 소나무를 예로 들어 CO<sub>2</sub> 흡수량 산정식을 설명하면, 0.8982는 단위엽면적당 연간 CO<sub>2</sub> 순흡수량이고, 0.8241은 단지 가을의 총엽면적 적용만으로 발생할 연간 흡수량 산정의 오차를

Table 4. Annual CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> uptake and annual O<sub>2</sub> production per tree by study specimens

| Species                 | DBH (cm) | CO <sub>2</sub> (kg) |         |               |            | SO <sub>2</sub> (g) | NO <sub>2</sub> (g) | O <sub>2</sub> (kg) |
|-------------------------|----------|----------------------|---------|---------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                         |          | Foliage              |         | Woody release | Net uptake |                     |                     |                     |
|                         |          | Total uptake         | Release |               |            |                     |                     |                     |
| <i>Pinus densiflora</i> | 18.7     | 62.3                 | 18.2    | 15.9          | 28.2       | 8.0                 | 13.5                | 20.5                |
|                         | 21.8     | 77.7                 | 24.7    | 22.3          | 30.7       | 10.4                | 17.6                | 22.3                |
|                         | 22.6     | 80.7                 | 26.8    | 24.2          | 29.7       | 11.0                | 18.7                | 21.6                |
| <i>Pinus koraiensis</i> | 20.0     | 81.9                 | 27.4    | 19.6          | 34.9       | 10.8                | 18.3                | 25.4                |
|                         | 33.2     | 191.9                | 64.8    | 57.9          | 69.2       | 25.5                | 43.2                | 50.3                |
|                         | 16.7     | 60.1                 | 20.2    | 13.3          | 26.6       | 8.0                 | 13.5                | 19.3                |

Table 5. Equations for each species generated to estimate annual CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> uptake per tree(kg)

| Species                 | Gas             | Equation*   |
|-------------------------|-----------------|---|
| <i>Pinus densiflora</i> | CO <sub>2</sub> | $e^{(-0.9896 + 1.7140 \ln \text{DBH})} \times 0.8982 \times 0.8241 - e^{(-4.2318 + 2.4175 \ln \text{DBH})} \times 0.8299$       |
|                         | SO <sub>2</sub> | $(e^{(-0.9896 + 1.7140 \ln \text{DBH})} \times 1.3037 \times 0.8241) \times 12.3416 \times (C_{\text{SO}_2} / C_{\text{CO}_2})$ |
|                         | NO <sub>2</sub> | $(e^{(-0.9896 + 1.7140 \ln \text{DBH})} \times 1.3037 \times 0.8241) \times 6.0193 \times (C_{\text{NO}_2} / C_{\text{CO}_2})$  |
| <i>Pinus koraiensis</i> | CO <sub>2</sub> | $e^{(-0.6065 + 1.6955 \ln \text{DBH})} \times 0.7176 \times 0.8657 - e^{(-3.3132 + 2.1351 \ln \text{DBH})} \times 0.8299$       |
|                         | SO <sub>2</sub> | $(e^{(-0.6065 + 1.6955 \ln \text{DBH})} \times 1.0798 \times 0.8657) \times 12.3416 \times (C_{\text{SO}_2} / C_{\text{CO}_2})$ |
|                         | NO <sub>2</sub> | $(e^{(-0.6065 + 1.6955 \ln \text{DBH})} \times 1.0798 \times 0.8657) \times 6.0193 \times (C_{\text{NO}_2} / C_{\text{CO}_2})$  |

\* C<sub>SO<sub>2</sub></sub>, C<sub>NO<sub>2</sub></sub>, and C<sub>CO<sub>2</sub></sub> indicate atmospheric concentrations in ppm of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub>, respectively.

월별 엽면적 변화를 반영하여 보정하는 계수이며, 0.8299는 단위가지중량당 비동화기관의 연간 호흡량이다. 소나무의 SO<sub>2</sub> 흡수량 산정식에서, 1.3037은 단위엽면적당 연간 CO<sub>2</sub> 총흡수량이며, 12.3416은 CO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>간 단위체적 및 단위농도당 중량의 흡수속도비이다.

상기한 수식을 적용하면, 잣나무의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수 및 O<sub>2</sub> 생산량은 소나무보다 동일 흉고직경하에서 1.2~1.3배 많았고, 연간 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 흡수량도 잣나무가 동일 직경의 소나무보다 약 1.2배 많았다. 생장기간 중 소나무의 단위엽면적당 CO<sub>2</sub> 흡수량 실측치가 잣나무보다 높았음에도 불구하고, 소나무의 연간 대기정화량이 잣나무보다 적은 이유는 소나무 단목의 총엽면적이 동일 직경의 잣나무보다 상대적으로 작기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구에서 제시한 수식은 단목 레벨에서만 아니라, 흉고직경과 밀도의 측정으로부터 일정 도시면적 내 침엽수에 의한 연간 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 흡수 및 O<sub>2</sub> 생산량을 용이하게 산출하는 데 활용될 수 있다.

## 인용문헌

김기원(1984) 삼림육장 설계를 위한 기초연구. 한국임학회지 65: 31-42.  
 박인협, 이석면(1990) 한국산 4개 지역형 소나무 천연림의 물질생산에 관한 연구. 한국임학회지 79(2): 196-204.  
 에너지관리공단(1996) 지역에너지계획 수립 기본지침

서. 672쪽.  
 이경재(1993) 대기오염과 산성비가 생태계에 미치는 영향. 한국대기보전학회지 9(1): 11-18.  
 이경재, 박인협(1987) 경기도 광주지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질생산량과 무기영양분포. 임산에너지 7(1): 11-21.  
 조현길, 조동하(1998) 도시 주요 조경수종의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수. 한국조경학회지 26(2): 38-53.  
 根岸賢一郎(1970) 樹木の非同化器官の呼吸. 日林誌 52(11): 331-345.  
 Ceulemans, R. J. and B. Saugier(1991) Photosynthesis. In: A. S. Raghavendra(ed.), Physiology of Trees, John Wiley & Sons, New York, pp. 21-50.  
 Hill, A. C.(1971) Vegetation: a sink for atmospheric pollutants. Journal of the Air Pollution Control Association 21(6): 341-346.  
 Jo, H. K. and T. W. Ahn(2001). Atmospheric CO<sub>2</sub> uptake by *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica*. Journal of Plant Research(in submission).  
 Lieth(1963) The role of vegetation in the carbon dioxide content of the atmosphere. Journal of Geophysical Research 68(13): 3887-3898.  
 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: G. M. Woodwell and E. V. Pecan(eds.), Carbon and the Biosphere, Proceedings of the 24th Brookhaven Symposium in Biology, US Atomic Energy Commission, Office of Information Services, Upton, NY, pp. 345-365.