

도시녹지에 의한 대기 CO₂의 흡수

-춘천시를 대상으로-

조현길 · 윤영환 · 이기의

강원대학교 녹지조경학과

Atmospheric CO₂ Sequestration by Urban Greenspace

-In the Case of Chuncheon-

Jo, Hyun-Kil · Yun, Young-Hwal · Lee, Ki-Eui

Dept. of Landscape Architecture, Kangweon National University

ABSTRACT

The purpose of this study was to assess function of urban greenspace to reduce atmospheric CO₂ concentration. The study quantified carbon storage in urban greenspace and carbon emission by fossil fuel consumption in Chuncheon. The amount of carbon storage in vegetation by land use type was 0.02kg/m² for agricultural land, 0.13kg/m² for commercial land, 4.36kg/m² for natural land, and 0.54kg/m² for the other urban lands. In 1994, total amount of carbon emission by fossil fuel consumption was about 257,358 metric tons, and the per capita carbon emission was 1.4 metric ton. Total amount of carbon storage in vegetation was 42,942 metric tons, approximately 17% of the carbon emission.

This study excluded quantification of carbon storage in soils. The role of urban greenspace to sequester atmospheric carbon might be much greater, if a soil carbon storage is included. However, increasing coverage of trees and managing them for healthy growth would not be sufficient for avoiding adverse impacts by future climate change. Additional measures should be followed such as an increase of energy use efficiency and development of substitute energy.

I. 서론

온실효과 및 기후변화는 현재 가장 심각한 세계 환경관심사 중의 하나이다. 온실효과를 야기시키는 주요 가스는 CO₂, CH₄, N₂O, 대류권의 O₃, 성층권의 수증기, CFCs (Chloro-fluorocarbons) 등이다(Ciborowski, 1989). 이들 온실가스 중, CO₂는 현재 기후변화를 야기시키는데 있어 약 50%의 영향력을 발휘하는 가스로서(Ciborowski, 1989; Rodhe, 1990), 기후변화와 관련하여 가장 집중적인 연구의 대상이 되어 왔다.

대기 CO₂의 농도는 현재 약 350 ppm으로서 산업화 이전의 280 ppm으로부터 25%의 증가를 보여주고 있다(Post et al., 1990). 대기 CO₂ 농도의 연증가율은 약 0.4%로 추정된다. 이러한 CO₂ 농도의 계속적인 증가는, 대기에서의 CO₂ 배출을 최소화하기 위한 적절한 조치가 마련되지 않는다면, 향후 50-100년 이내에 지구의 평균온도를 2-5℃ 상승시킬 것이다(Hansen et al., 1988; Washington and Meehl, 1989). 장래의 온난화는 자연생태계와 사회경제적 시스템에 심각한 악영향을 미칠 것으로 예측된다(Emanuel et al., 1985; Melillo et al., 1990; Kemp, 1990).

세계기후변화의 심각성은 최근 도시녹지가 그 영향의 완화 혹은 지연에 공헌할 가능성의 여부를 검토하는 연구들을 태동시켰다. Rowntree와 Nowak(1991)은 소규모 사무실에서의 에너지 소비로부터 방출되는 CO₂의 양을 상쇄시키는데 필요한 수목의 식재량을 산정한 바 있다. Nowak(1993)은 California의 Oakland시에 식재된 수목의 탄소저장량과 직경급분석의 결과를 토대로 미국내 전 도시수목에 의한 탄소저장량을 추정하고, 대기탄소의 농도에 미치는 장래 도시식재의 효과를 검토하였다. Jo(1993)는 Chicago의 주택지역에서의 탄소순환을 모델링하고 주택녹지에 의한 CO₂의 흡수와 방출을 비교적 상세하게 연구한 바 있다. 그러나, 대기 CO₂의 흡수와 저장에 기여하는 도시녹지 기능의 양적화는 외국에서

도 아직 초보단계이며, 국내의 경우 그와 관련된 연구는 전무한 실정이다.

온실효과는 세계 각국 여러지역에서의 CO₂ 배출의 누적적인 영향의 결과라고 해석될 수 있으며, 이의 완화는 각 국가별 및 지역별 대기 CO₂ 농도의 저감을 지향한 총체적 대책 마련을 필요로 한다. 대기 CO₂ 농도의 증가는 자동차, 발전소, 공장, 가정 등에서의 화석연료(석탄, 석유, 천연가스)의 사용과 무분별한 삼림벌채에 기인된다(Detwiler and Hall, 1987; Schneider, 1990). 결국, 예측된 기후변화의 지연 혹은 완화는 화석에너지의 절약 및 대체에너지의 개발(예를 들면, 태양에너지), 삼림훼손의 통제, 그리고 식생복구만을 통해 가능할 것이다. 인구증가, 도시화, 삼림지의 농경지 전환 등은 계속 자연삼림을 훼손하여 수목과 토양에 저장된 탄소를 방출시키고 있다. 도시녹지율의 확보와 적합한 배식은 대체에너지의 개발보다 대기 CO₂ 농도를 감소시키는데 있어 시간과 비용의 절약면에서 효율적일 뿐만 아니라, 삼림훼손의 그 영향을 상쇄시키기 위한 대체적 역할의 일부를 담당할 수 있을 것이라고 사료된다.

본 연구의 목적은 춘천시를 대상으로 도시녹지에 의한 탄소저장과 화석연료사용에 의한 CO₂ 배출을 계량화하여, 대기 CO₂ 농도의 감소에 작용하는 도시녹지의 기능을 평가하기 위함이었다. 본 연구에서 춘천시는 시군통합이전의 행정구역을 지칭하며, 탄소저장량의 산정은 초본, 관목, 교목 등 토양을 제외한 식생전체를 대상으로 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 토지이용현황 분석

토지이용유형별로 식생에 의한 탄소저장량을 산정하기 위한 기반자료를 획득하기 위하여, 1992년 9월에 촬영된 항공사진(축척: 1/15,000)을 이용하여 춘천시의 토지이용현황

을 분석하였다. 1cm 간격의 격자가 그려진 투명 셀로판지를 항공사진위에 올려 놓고 체계적 표본추출(Systematic sampling)을 통해, 총 2,464개의 표본추출지점을 선정하고 해당 지점의 토지이용 및 토지피복(Land cover) 유형을 판독하였다.

2. 녹지구조 조사

충천시 행정구역 전체(1993년 2월 기준)를 포함하는 지도(축척: 1/10,000)상에서 운교동 로타리를 도심지역의 중심으로 결정한 후, 이 중심점에서 8개의 등방향으로 각 방향의 행정구역 경계선까지 직선을 연장하고 1cm 등간격의 표본추출지점들을 설정하였다. 이들 전체의 표본추출지점 중 50%에 해당하는 총 151개 지점을 다시 임의표본추출(Random number 이용)한 후(151개의 표본추출지점 중 수면, 군통제지역 등을 제외한 실제 표본추출수는 125개였음), 현지답사를 통해 해당지점의 토지이용유형을 기록하고 수종, 흉고직경 및 근원직경(지상 15cm 부위), 수고, 피도, 잠재식재면적 등을 조사하였다.

식생조사는 토지이용유형에 따라 적정하다고 판단된 방법들을 구분하여 적용하였다. 주거지, 상업지, 공업지 및 공공용지(병원, 은행, 학교 및 기타 공공기관)의 경우, 표본추출지점 가장 가까이에 위치하는 주택 또는 건물의 부지경계내에 분포하는 식생을 전수조사하고 그 부지면적을 측정하였다. 자연지, 농경지, 행락지(유원지 및 도심공원) 등에서의 식생조사는 방형구법(Quadrat method)을 적용하였으며, 방형구의 크기는 교목층의 경우 15 × 15m, 관목층의 경우 5 × 5m, 그리고 초본의 경우 1 × 1m이었다. 본 연구에서 관목층이란 흉고직경 2cm 이하의 목본식물을 지칭한다. 단, 수목의 직경급 분석에서 관목은 한국종합조경공사(1979)와 이창복(1985)의 분류에 따라 교목과 구분되었으며, 이는 교목을 장래 탄소저장잠재력을 추정하는 기반자료로 활용하기 위함이었다.

3. 생체량 및 탄소저장량 산정

출현빈도가 높은 일부주요수종의 지상부 생체량(Biomass in dry weight) 산정은 연구대상지 또는 그 인근지역의 수목을 별목하여 직접 구한 상대생장식(Allometric equation), 즉 생체량방정식(Biomass equation)을 이용하였다. 각 수종의 생체량방정식의 유도에 있어서는 수고와 흉고직경 또는 근원직경을 종속변수로 하되, 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 회귀식과 변수를 최종 결정하였다.

자연지에서는 총 6개수종 183개체를 별목하였으며, 교목으로서 소나무(*Pinus densiflora*) 20개체와 잣나무(*Pinus koraiensis*) 15개체를, 관목층으로서 소나무 30개체, 신갈나무(*Quercus mongolica*) 29개체, 철쭉(*Rhododendron schlippenbachii*) 30개체, 진달래(*Rhododendron mucronulatum*) 29개체, 싸리(*Lespedeza bicolor*) 30개체를 각각 별목하였다. 도심에 식재된 수종으로는 플라타너스(*Platanus occidentalis*) 1개종 7개체만이 별목되었다. 소나무와 잣나무 교목은 연구대상지 인접지인 홍천군 내면 및 두촌면에서 별목되었으며, 관목층 수목은 식생 표본추출지점들을 중심으로 분산 별목되었다. 상기 모든수종의 별목은 1994년 가을에 낙엽이 되기 전에 실시되었다. 관목층의 수목들은 별목 직후 수목 지상부 전체를 개체별로 이중 비닐백에 넣어 실험실로 운반하였다. 운반된 표본들의 생체량은 별목후 4시간 이내에 측정되었으며, 각 수종별로 10개체씩 임의표본추출하여 65℃하의 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시켜 건중량을 측정하였다. 성목(成木)의 소나무, 잣나무, 플라타너스 등은 실험실로의 운반이 난이하여 그들의 생체량은 직접 별목현지에서 측정되었으며, 그들의 건중량은 Phillips(1981)와 Smith(1985)의 방법에 의해 산정되었다.

기타 수종들의 총생체량과 상기 별목수종의 지하부 생체량은 별목 및 근굴취의 난이성에

기인되어 다수의 타연구에서 제시된 생체량방정식을 이용하여 생체량을 산정하였다(Table 1 참조). 수목의 생체량은 동일 수종이라도 수목생장을 좌우하는 성장지역의 각종 환경조건에 따라 상이할 수 있다. 그러므로, 타연구들에 의한 생체량방정식의 이용은 그 방정식이 유도된 수목직경급 범위내의 개체에 한정되었고, 개체별로 단 하나의 생체량방정식만을 적용하는 것을 지양하고, 가급적 다수(최대 5개)의 방정식을 적용하여 그 평균치를 해당 수목개체의 생체량으로 결정하므로써, 가능한 한 산정치의 신뢰성을 증진하는데 주력하였다. 생체량방정식을 구할 수 없는 특정수종의 경우는 동일속(Genus) 또는 그룹(활엽수 또는 침엽수)의 방정식들을 대용하여 평균생체량을 산정하였다.

Table 1. Sources of biomass equations used to calculate plant biomass

Species	Diameter range(cm)	Reference
<i>Abies</i> spp.	0.5-33(D) 2.5-25.0(DBH) 2.5-40.0(DBH)	Roussopoulos & Loomis(1979) Stanek & State(1978) Stanek & State(1978)
<i>Acer</i> spp.	1.1-40.5(DBH) 0.3-4.1(D) 0.3-4.3(D) <10.0(DEH) 1.0-30.0(DBH) 2.5-66.0(DBH) 2.5-66.0(DBH) *	Ker(1980) Roussopoulos & Loomis(1979) Roussopoulos & Loomis(1979) Tritton & Hornbeck(1982) Tritton & Hornbeck(1982) Tritton & Hornbeck(1982) Wenger(1984) Whittaker & Marks(1975)
<i>Alnus</i> spp.	0.8-4.1(D)	Roussopoulos & Loomis(1979)
<i>Betula</i> spp.	0.3-2.3(D) 0.5-3.3(D) 1.0-23.0(DBH) 2.5-66.0(DBH) *	Connolly(1981) Roussopoulos & Loomis(1979) Tritton & Hornbeck(1982) Wenger(1984) Whittaker & Marks(1975)
<i>Cornus</i> spp.	0.3-1.8(D) 0.7-3.3(D) 2.5-12.4(DBH) 0.3-3.6(D)	Connolly(1981) Harrington et al.(1989) Phillips(1981) Roussopoulos & Loomis(1979)
<i>Corylus</i> spp.	0.3-2.5(D)	Roussopoulos & Loomis(1979)
<i>Crataegus</i> spp.	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), Phillips(1981)
<i>Fraxinus</i> spp.	0.9-27.9(DBH) 5.1-50.8(DBH)	Ker(1980) Tritton & Hornbeck(1982)
<i>Juglans</i> spp.	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), Phillips(1981)

Species	Diameter range(cm)	Reference
<i>Juniperus</i> spp.	<12.7(DBH) 0.8-2.9(D)	Hahn(1984), Smith(1985), Phillips(1981) Smith & Brand(1983)
<i>Liriodendron tulipifera</i>	15.0-70.0(DBH) 5.0-50.0(DBH)	Clark & Brand(1983) Tritton & Hornbeck(1982)
<i>Picea</i> spp.	1.0-3.0(D) 1.0-15.0(DBH) 1.5-17.7(DBH) 14.3-24.5(DBH) 2.5-66.0(DBH)	Czapowskj et al.(1985) Czapowskj et al.(1985) Ker & van Raalte(1981) Stanek & State(1978) Wenger(1984)
<i>Pinus</i> spp.	2.1-36.9(DBH) 2.9-31.7(DBH) 14.5-24.5(DBH) 2.8-32.3(DBH) 2.5-66.0(DBH)	Ker(1980) Stanek & State(1978) Stanek & State(1978) Wenger(1984) Wenger(1984)
<i>Populus</i> spp.	0.5-3.3(D) 14.5-24.5(DBH) 4.5-33.0(DBH) *	Roussopoulos & Loomis(1979) Stanek & State(1978) Stanek & State(1978) Whittaker & Marks(1975)
<i>Prunus</i> spp.	0.7-2.9(D) 0.8-3.8(D) 1.0-10.0(DBH) 2.5-22.9(DBH) *	Harrington et al.(1989) Roussopoulos & Loomis(1979) Tritton & Hornbeck(1982) Tritton & Hornbeck(1982) Whittaker & Marks(1975)
<i>Quercus</i> spp.	5.0-50.0(DBH) 5.0-50.0(DBH) 5.0-40.0(DBH)	Tritton & Hornbeck(1982) Tritton & Hornbeck(1982) Wenger(1984)
<i>Rosa</i> spp.	0.2-1.2(D)	Smith & Brand(1983)
<i>Salix</i> spp.	0.3-3.0(D) 0.8-3.8(D) 0.5-3.0(D)	Connolly(1981) Ohmann et al.(1976) Roussopoulos & Loomis(1979)
<i>Spiraea</i> spp.	0.3-1.3(D)	Connolly(1981)
<i>Thuja</i> spp.	2.2-30.2(DBH) 0.3-5.1(D) 2.5-10.0(DBH)	Ker(1980) Roussopoulos & Loomis(1979) Stanek & State(1978)
<i>Ulmus</i> spp.	<12.7(DBH) 45.7-96.5(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), Phillips(1981) Jo(1993)
<i>Viburnum</i> spp.	0.3-1.6(D) 0.3-3.1(D)	Telfer(1969) Smith & Brand(1983)
General hardwoods	25.4-99.1(DBH) <12(DBH) 2.5-15.2(DBH) 2.5-25.4(DBH) <10(DBH) *	Jo(1993) Monteith(1979) Tritton & Hornbeck(1982) Tritton & Hornbeck(1982) Tritton & Hornbeck(1982) Whittaker & Marks(1975)
General softwoods	<12.7(DBH) 2.5-55.0(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), Phillips(1981) Monteith(1979)

수목의 목질부 및 엽의 평균 탄소함량은 건중량의 약 50%인 것으로 보고된다(USDA Forest Products Laboratory, 1952; Millikin, 1955; Ovington, 1956; Reichle et al., 1973; Pingrey, 1976; Ajtay et al., 1979; Chow and Rolfe, 1989). 따라서, 수목개체별 총생체량은 이것에 0.5를 곱하여 탄소저장량으로 전환되었다.

초본식물의 경우, 식생조사시 설정된 임의표본추출지점들의 일부(n=19)에서 1 × 1m 크기의 방형구를 설치하고, 그 방형구내에 존재하는 초본 전체의 지상부를 수확하였다. 이들 표본은 수확 직후 현장에서 생중량을 측정 한 후 비닐백에 넣어 실험실로 운반되었다. 운반된 표본들의 건중량은 65℃하의 건조기에서 24시간 동안 건조시킨 후 측정되었다. 초본식물의 지하부 생체량은 지상부 생체량을 1.39로 나누어 산정되었고(Korner and Renhardt, 1987), 총생체량에 0.45를 곱하여 탄소저장량으로 전환되었다(Olson, 1970; Ajtay et al., 1979). 본 연구에서 초본성 농작물에 의한 탄소저장량 산정은 배제되었다.

4. CO₂ 배출량 조사

춘천시민이 연간 소비하는 전기, 석유, 가스, 연탄 등의 용도별 화석에너지 총량을 시청, 한국전력공사 및 해당 에너지 취급처를 방문하여 파악하였다. 각 에너지별 소비량은 탄소배출계수 관련 문헌을 참조하여 대기への 탄소배출량으로 전환되었다. 전기의 경우, 공급된 총전력 중 수력, 원자력, 화력 등 전력원별 구성비를 파악한 후(춘천전력소), 화력발전이 있어서는 1kWh의 소비전력당 탄소 0.45kg의 비율에 근거하여(Sampson et al., 1992) 탄소배출량을 산정하였다. 원자력 및 수력발전에 의한 CO₂배출은 극히 저량이므로(DeCicco et al., 1990; Rowntree and Nowak, 1991) 산정에서 제외되었다. 석유소비에 의한 배출량 산정은 가솔린(Gasoline)의 경우 1L(리터)당 탄소 0.60kg(Akbari et al.,

1989), 기타 석유류(Kerosene, Diesel 등)의 경우 1L당 탄소 0.73kg(Rowntree and Nowak, 1991)의 배출계수를 이용하였다. 가스에 있어서는 천연가스에 준하여 1,000m³의 단위소비량에 36.55를 곱하여 mBtu(Million Btu)로 전환하고, mBtu당 탄소 14.20kg의 배출계수를 이용하여 배출량을 추정하였다(Nowak, 1994). 연탄소비로부터의 배출량은 표준발열량 4,300kcal/kg(이재장, 강원대 산업공학과 교수)과 탄소 25.5kg/GJ(Gigajoule)(Marland and Rotty, 1984)의 배출계수를 활용하여 산정되었다.

5. 장래 탄소저장잠재력 추정

식생조사시 선정된 표본추출지점별로 장래 수목의 식재가능한 실제적 공간체적을 조사하여 예측된 장래 녹지구조의 탄소저장력을 추정하였다. 식재잠재력은 기존 가공선(架空線)의 방해없이 생장할 수 있는 수관폭 3m × 수고 3m 이상의 교목만을 포함하였으며, 식재가능한 면적을 비롯하여 수목의 크기 및 수가 조사되었다. 본 조사에서 자연지, 농경지 및 공원의 토지이용유형은 제외되었다.

또한, 현존 교목을 대상으로 그들이 향후 20년까지 성장했을때 흡수저장할 수 있는 탄소량이 모델링되었다. 모델링 절차는 우선 현존 교목의 직경급 분포를 분석하고, 침엽수와 활엽수로 구분하여 각 직경급내에 해당하는 교목의 개체수를 파악하였다. 한국 중부지방에서 성장하는 침엽교목의 연간 평균직경생장율인 0.31cm(박완근, 1987)와 활엽교목의 연간 직경생장율인 0.68cm(정성호외 2인, 1983)를 이용하여, 장래 20년까지의 연간 증가된 흉고직경을 추정하였다. 그리고, 침엽교목은 박인협과 김준선(1989), 이경재와 박인협(1987), 임경빈외 3인(1982) 등의 생체량방정식들(일부 변형)을, 활엽교목의 경우는 박인협(1985), 이경재와 박인협(1987) 등의 생체량방정식들(일부 변형)을 이용하여 평균생체량을 산정하고, 이를 흡수 저장된 탄소량으로 전환하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 춘천시 개황

춘천시는 동경 127° 40′-53′과 북위 37° 49′-56′사이에 위치하는 강원도 도청소재지이다. 본 시는 태백산맥의 소지맥에 의해 위요된 산간분지로서 표고 80-110m에 시가지를 형성하고 있고, 도심에는 정상표고 301m인 봉의산이 위치하여 도시녹지로서의 주요한 기능을 담당하고 있다. 1989년에서 1993년까지 5개년의 연평균기온과 평균연강수량은 각각 11.2℃, 1,369.8mm이었다(춘천시, 1994). 시의 총인구와 가구수는 1994년 12월말 현재 각각 187,442명, 56,601가구이었다(춘천시 통계계).

2. 토지이용현황

춘천군을 제외한 춘천시 행정구역상의 총면적은 약 28.2km²인 것으로 나타났다. 이 면적은 축척 1/10,000 및 1/25,000의 지도상에서 Digital planimeter를 이용하여 10회 반복 측정된 평균치이다. Table 2의 토지이용유형비에서 볼 수 있듯이, 자연지(자연공원 포함)가 총면적 중 거의 과반수에 해당하는 46.9%를 차지하고 있었다. 그 다음의 순으로 농경지가 26.3%, 주거지가 13.2%, 그리고

Table 2. Percentages of land use and land cover types in Chuncheon.

Land use	Land cover					Total
	Tree/shrub	Grass/soil	Building	Pavement	Water	
Residential	3.5	2.7	6.6	0.4	0	13.2
Commercial	0.4	0.3	0.9	0.3	0	1.9
Industrial	0.1	0.5	0.4	0	0	1.0
Institutional	2.4	1.9	0.7	0.6	0.1	5.7
Recreational	0.9	1.8	0.1	0.1	0	2.9
Agricultural	2.0	23.2	0.1	0.1	0.9	26.3
Natural*	26.7	4.9	0	0	15.3	46.9
Others**	1.9	0	0	0.2	0	2.1
Total	37.9	35.3	8.8	1.7	16.3	100.0

Note: * Natural lands include natural parks.

** Others include bus terminals, railyards, and vacant areas.

공공용지가 5.7%를 각각 구성하는 것으로 나타났다. 상업지, 공업지 및 행락지는 3% 미만에 불과하였다. 자연지의 구성비가 높은 이유는 주변의 산지 대부분이 그린벨트로서 개발이 제한되어 왔고, 시의 서쪽에 상당한 면적의 의암호가 분포하기 때문인 것으로 해석된다. 미국내 도시들의 경우엔 전체면적의 약 50%를 주거지가 차지하는 것으로 보고된다(Sampson et al., 1992; McPherson et al., 1993).

토지피복유형들의 구성을 분석하여 보면 (Table 2 참조), 교목 및 관목이 37.9%로서 가장 높은 면적비를 나타냈고, 그 다음이 초본 및 나지 35.3%, 물 16.3% 등의 순으로 나타났다. 초본 및 나지면적이 큰 이유는 시의 북쪽에 농경지가 우점하기 때문이다. 건물과 포장(Hard surface)은 전체적으로 10.5%를 차지하였으나, 주거지, 상업지 등 도심 토지이용에서는 수목피도보다 높은 구성비를 보였다. 이와 같이, 춘천시는 자연식생지, 농경지 및 수역이 상대적으로 넓게 분포하는 전원 및 호반도시임을 알 수 있다.

3. 녹지구조

Figure 1과 2는 연구대상지에서 표본추출된 교목과 관목의 직경급 분포를 나타내 준다. 자연지를 비롯하여 대부분 인공식재되었을 기타 도시토지이용들 모두에서 유목내지는 성장과정의 수목들이 우점하고 있었다. 교목의 경우 약 96%가 흉고직경 20cm 이하에 속하는 수목들이었고, 관목의 경우 근원직경 5cm 이하의 수목이 자연지에서 약 99%를, 기타 토지이용들에서 92%를 점유하였다. 이러한 유형의 수령구조는 불량한 도시환경과 자연식물군집내 경쟁으로 말미암아 유목의 활착과 관련된 사멸율이 상당하여(Richards, 1979; McPherson et al., 1993), 정상적인 생육을 확보하기 위해 적지 않은 관리가 요구될 수 있다. Richards(1983)는 수목개체군의 안정성의 견지에서 권고할 만한 수령구조는 흉고직경 20cm 이하가 40%, 20-

40cm가 30%, 40-60cm가 20%, 그리고 60cm 이상이 10%일 경우라고 보고하였다. 미국의 일부 도시들(California주의 Oakland, Illinois주의 Chicago 등) 역시 춘천시의 그것과 유사한 직경구조를 보이니(Nowak, 1991 & 1994), 흉고직경 30cm 이하의 교목분포가 상대적으로 훨씬 적고(약 80%) 장령의 수목분포가 더욱 많다는 것이 상이하였다.

연구대상지에서 출현된 총 종수는 자연지의 경우 교목 27종 및 관목 19종이었고, 기타 도시토지이용들의 경우 교목 57종 및 관목 28종이었다. 상대밀도 10% 이상의 우점종은 자연지의 경우 신갈나무(*Quercus mongolica*),

소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 아카시아(*Robinia pseudo-acacia*), 진 달 래 (*Rhododendron mucronulatum*), 싸 리 (*Lespedeza bicolor*) 등이었다. 기타 도시토지이용들의 경우, 주요 출현종은 향나무(*Juniperus chinensis*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 은행나무(*Ginkgo biloba*), 회양목(*Buxus microphylla* var. *koreana*), 철쭉(*Rhododendron schlippenbachii*) 등이었다.

Table 3는 토지이용유형별 100m²당 수목의 출현개체수, 직경단면적 및 피도를 보여 준

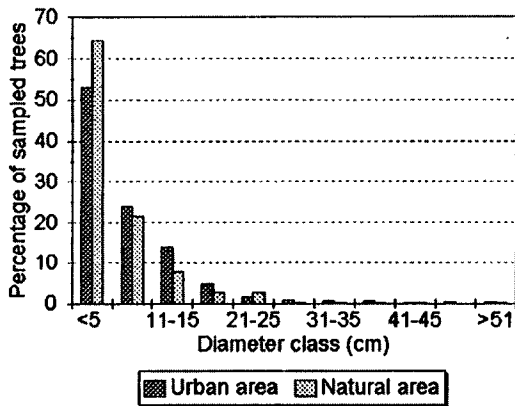


Figure 1. Dbh distribution of trees sampled in Chuncheon*.

Note: *Urban area includes trees within other urban land uses than natural area.

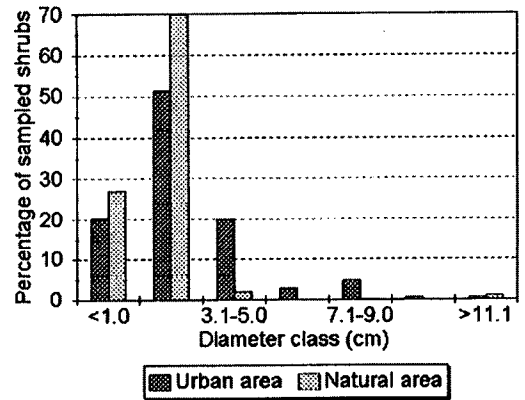


Figure 2. Diameter(at 15cm aboveground level) distribution of shrubs sampled in Chuncheon*.

Note: *Urban area includes trees within other urban land uses than natural area.

Table 3. Number, basal area (sq. cm) and cover (sq. m) of woody plants per 100sq. m by land use type in Chuncheon*.

Land use	Tree layer						Shrub layer					
	Number		Basal area		Cover		Number		Basal area		Cover	
	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE
Residential	1.8	0.2	143.2	23.4	12.8	1.9	4.3	0.8	22.3	4.0	3.6	0.8
Commercial	1.0	0.3	50.3	18.2	5.4	2.2	1.4	0.8	6.3	3.5	0.7	0.4
Institutional	2.1	0.5	359.7	112.2	21.4	7.8	5.4	1.9	34.3	13.7	2.3	0.8
Agricultural	0.1	0	7.5	5.0	0.6	0	0	0	0	0	0	0
Natural	16.6	2.4	1,312.0	154.4	149.1	20.9	105.2	15.3	249.0	50.7	93.6	20.2
Others	1.2	0.2	341.3	119.9	10.0	2.6	0.4	0.4	13.7	13.7	0.8	0.8

Note: *Basal area was measured at breast height for tree layer and at 15cm above ground for shrub layer. SE=Standard error.

다. 출현개체수, 직경단면적 및 피도 모두는 자연지, 농경지 및 기타 토지이용유형들간에 현저한 차이를 나타내었으며, 농경지에서는 관목층이 부재하였다. 교목층의 개체수는 자연지에서 100m²당 약 16본, 농경지에서 0본, 그리고 기타 토지이용들에서 1-2본이었고, 관목층의 개체수는 자연지에서 105본, 기타 토지이용들에서 1-5본이었다. 교목층의 흉고단면적은 자연지에서 100m²당 약 1,312cm², 농경지에서 8cm², 그리고 기타 토지이용들에서 50-360cm²이었고, 관목층의 근원단면적은 자연지에서 249cm², 기타 토지이용들에서 6-34cm²이었다. 교목층의 피도는 자연지에서 100m²당 약 149m², 농경지에서 0.6m², 그리고 기타 토지이용들에서 5-21m²이었고, 관목층의 경우는 자연지에서 94m², 기타 토지이용들에서 1-4m²이었다.

4. 녹지의 탄소저장량

연구대상지에 분포하는 교목층의 단위흉고 단면적당(cm²) 탄소저장량은 평균 0.254kg (SE=0.005)이고, 단위피도당(m²) 탄소저장량은 평균 3.547kg(SE=0.315)인 것으로 분석되었다(Table 4 참조). 관목층의 단위근원단면적당 탄소저장량은 평균 0.061kg(SE=0.001)이고, 단위피도당 탄소저장량은 평균 0.457kg(SE=0.054)인 것으로 나타났다. Jo(1983)는 미국 Chicago의 주거지에서 교목과 관목에 저장된 단위피도당 탄소량이 각각

Table 4. The amount of carbon storage per unit basal area and unit cover of woody plants in Chuncheon*.

Carbon storage (kg)	Tree layer			Shrub layer		
	Mean	SE	CI	Mean	SE	CI
Per basal area (cm ²)	0.254	0.005	0.011	0.061	0.001	0.003
Per cover(m ²)	3.547	0.315	0.626	0.457	0.054	0.108

Note: * SE=Standard error, CI=95% confidence interval. Basal area was measured at breast height for tree layer and at 15cm above ground for shrub layer.

약 8.7kg, 3.6kg이라고 보고하였다. 춘천시에서 그들 저장량이 훨씬 적은 이유는 수령이 그만큼 어리기 때문인 것으로 판단된다. 자연지의 초본식물에 저장된 단위면적당(m²) 평균 탄소량은 0.07kg(SE=0.02)인 것으로 밝혀졌다. 농경지를 제외한 기타 토지이용들에서는 초본식물의 출현이 극히 빈약하였다.

Table 5는 토지이용별로 식생에 의한 단위면적당 탄소저장량과 총탄소저장량을 나타내 준다. 주거지와 공공용지간 단위면적당 탄소저장량은 95% 수준의 신뢰구간(CI: Confidence interval)에서 통계적으로 유의적인 차이가 없었다. 이들과 표본추출수가 극히 적었던 공업지 및 행락지를 포함한 토지이용들의 단위면적당 탄소저장량은 0.54kg/m²(N=64, SE=0.08, 95% CI=0.16)이었다. 상업지와 농경지는 각각 이보다 적은 0.13kg/m² 및 0.02kg/m²(농작물에 의한 탄소저장량은 제외)이었고, 자연지는 타 토지이용들의 것보다 훨씬 많은 4.36kg/m²(N=31, SE=0.51, 95% CI=1.05)이었다.

Table 5. The amount of carbon storage in vegetation by land use type in Chuncheon.

Land use	Carbon(kg)/m ² *			N	Total carbon (MT**)
	Mean	SE	CI		
Residential 1-3 family	0.40	0.06	0.13	36	
Multifamily	0.21	0.10	0.21	5	
Sub-total	0.38	0.06	0.12	41	
Commercial	0.13	0.04	0.10	12	69.7
Industrial	-	-	-	2	
Institutional	0.76	0.25	0.55	13	
Recreational	-	-	-	2	
Agricultural [†]	0.02	0.01	0.02	18	143.3
Natural	4.36	0.51	1.05	31	38,852.8
Others	1.26	0.41	1.04	6	
Urban total ^{##}	0.54	0.08	0.16	64	3,776.5
Total				125	42,842.3

Note: * SE=Standard error, CI=95% confidence interval. ** MT=Metric ton. [†] Carbon storage in herbaceous crops is excluded. ^{##} It sums up carbon storage for residential, industrial, institutional, recreational, and other lands among which there is no significant difference in carbon storage per unit area (95% CI) or for which sample sizes are extremely small.

Nowak(1994)은 미국 Illinois주의 Chicago에서 주거지와 자연지에서의 수목에 의한 단위면적당 탄소저장량이 각각 1.73kg/m², 3.42kg/m²이었음을 보고한 바 있다. 이와 비교하여 볼 때, 춘천시는 자연지의 경우 약간 더 많은 저장량을 보이나, 주거지에서는 수목 식재량의 절대 부족으로 기인되어 약 4.5배나 적은 현상을 나타냈다. 단위면적당 탄소저장량을 해당 토지이용별로 총탄소저장량으로 전환한 결과, 춘천시의 식생에 의해 흡수 고정된 총탄소량은 약 42,842톤인 것으로 합계되었다.

Table 6는 수목의 생체량과 탄소저장량을 산정하기 위해 유도된 주요수종별 생체량방정식들을 보여 준다. 방정식들의 R²은 최소 0.80, 최대 0.96으로서 그들의 적합도가 비교적 높은 것으로 해석된다. 기타 수종들의 생체량 산정은 미국의 북중부 및 북동부 지역에서 성장하는 유사수종의 생체량방정식들에 의존하였다. 한국에 분포하는 일부수종들의 상대생장식 대부분(임경빈의 7인, 1981; 이수옥, 1985; 이경재와 박인협, 1987; 박인협과 문광선, 1994)은 유도된 대상수목의 표본수가 적거나 직경급 범위가 불분명하여 그 이용을 지양하였다. Tritton과 Hornbeck(1982)은 특수한 입지를 제외하고는 대부분의 입지별 생체량방정식간에는 생체량 산정결과의 차이가

없다고 보고하였으나, 박인협과 김준선(1989)은 입지별 그 차이가 있음을 시사하였다.

저자들은 본 연구에서 비교적 빈도높게 활용된 미국의 생체량방정식들과 한국 수종들의 생체량방정식을, 침엽수와 활엽수로 구분하여 해당 직경급내 임의의 10개체를 대상으로 그 산정결과의 차이를 분석하여 보았다. 침엽수로는 한국의 경우 *Pinus densiflora*(박인협과 김준선, 1989), *Pinus koraiensis*(이경재와 박인협, 1987), *Pinus rigida*(임경빈외 3인, 1982) 등 3개 수종을, 미국의 경우 *Abies balsamea*(Stanek and State, 1978), *Picea glauca* and *P. rubens*(Wenger, 1984), *Pinus banksiana*(Wenger, 1984), *Pinus strobus*(Wenger, 1984) 등 5개 수종의 평균생체량을 비교하였다. 활엽수로는 한국의 경우 *Acer mono*외 5개 수종(박인협, 1985), *Quercus mongolica*(이경재와 박인협, 1987) 등 2개의 생체량회귀식을, 미국의 경우 General hardwoods를 위한 3개의 회귀식(Tritton and Hornbeck, 1982)을 이용하여 그 평균치를 비교하였다. 그 결과, 침엽수의 생체량은 양 국가의 입지간 유의적인 차이가 없었으나(p>0.05), 활엽수의 경우는 한국 수목의 생체량이 미국 수목보다 평균 약 9% 더 많았다. 이러한 차이는 선정된 생체량방정식의 종류, 그 방정식이 유도된 입지조건, 대상 수목의 직경급 등에 따라 유동적일 수 있으나, 상기 결과에 준하면 양 국가의 입지간 생체량의 차이는 대폭적이지는 않았다. 그러나, 본 연구는 일부 주요 출현종을 제외하곤 타연구들의 생체량방정식을 이용하였으므로, 제시된 연구지의 탄소저장량은 정확치라기보다는 개략치로서 해석되어야 할 것이다.

Table 6. Biomass equations generated to calculate total above-ground biomass of main species in Chuncheon*.

Species	Equations	R ²	N	Diameter (cm)
<i>Pinus koraiensis</i>	lnDW(kg)=-1.2187+0.8499 lnDBH	0.89	15	8.0-14.0
<i>Pinus densiflora</i>	lnDW(kg)=-1.2034+1.2622 lnDBH	0.80	20	16.0-24.0
	DW(g)=-351.4+356.5 D	0.89	30	1.0- 3.6
<i>Platanus occidentalis</i>	DW(kg)=-322.2+17.8 DBH	0.96	7	25.5-60.5
<i>Quercus mongolica</i>	lnDW(g)=-4.3201+2.2247 lnD	0.90	29	0.6- 4.0
<i>Rhododendron m ucronulatum</i>	lnDW(g)=3.7358+2.3956 lnD	0.89	29	0.6- 3.4
<i>Rhododendron s chlippenbachii</i>	lnDW(g)=3.8294+2.4180 lnD	0.83	30	0.5- 2.6
<i>Lespedeza bicolor</i>	lnDW(g)=-4.4908+1.8457 lnD	0.87	30	0.5- 2.5

Note: * DW=Dry weight, D=Diameter at 15cm above ground.

5. 탄소배출량

Table 7은 연구대상지내에 거주하는 인구가 소비하는 화석연료 및 그로 인한 대기예의 탄소 배출의 양을 나타낸다. 연탄은 1993년보다

Table 7. Fossil fuel use and carbon emission in Chuncheon*.

Year	Electricity		Oil				Gas**		Briquet		Total carbon (MT)
	Use (mWh)	Carbon (MT)	Gasoline		Others***		Use (1000m3)	Carbon (MT)	Use (1000GJ)	Carbon (MT)	
			Use (kL)	Carbon (MT)	Use (kL)	Carbon (MT)					
1992	236,123	66,359	26,940	16,164	82,721	60,577	17,434	9,048	-	-	152,148
1993	261,707	73,549	34,882	20,929	105,778	77,462	21,180	10,992	1,383	35,272	218,204
1994	362,027	101,742	47,321	28,392	120,417	88,181	23,956	12,433	1,044	26,610	257,358

Note: * mWh=Millionwatthour, MT=Metric ton, kL=Kiloliter, GJ=Gigajoule.
 ** It includes propane, butane and town gas.
 *** It includes kerosene and diesel.

1994년의 소비량이 적었으나, 전기, 석유 및 가스의 소비는 해마다 증가추세를 보였다. 1994년 현재, 전기소비량은 362,027mWh, 석유류는 167,738kL, 가스류는 23,956,000m³, 그리고 연탄은 1,044,000GJ이었다. 연구대상지에 공급되는 충전기에너지 중 약 62.0%는 화력, 35.5%는 원자력, 그리고 2.5%는 수력에 의한 것이었다(춘천전력소).

소비된 화석연료의 종류별 탄소배출량은 1994년에 전기 약 101,742톤, 석유류 116,573톤, 가스류 12,433톤, 그리고 연탄 26,610톤으로서, 자동차 및 난방용 석유류 소비로부터의 배출량이 가장 높았다. 이들을 합한 총탄소배출량은 257,358톤이었으며, 가구당 및 인구 1인당 탄소배출량은 각각 약 4.5톤 및 1.4톤이었다. 춘천시의 인구 1인당 탄소배출량은 미국의 2.3톤보다 적으나, 일본의 0.9톤보다 높다(Rowntree and Nowak, 1991). 연구지내 식생이 현재 흡수 고정된 총탄소량(42,842톤)은 1994년에너지소비에 의해 대기중에 배출된 총탄소량의 약 17%에 달하는 양이다.

6. 탄소저장잠재력

Figure 3은 대상지의 현존 교목들이 1994년 현재 이후 20년 동안 성장할 때 흡수 저장 가능한 탄소량을 모델링한 결과이다. 본 계량화에서는 흉고직경 6-25cm 범위내의 교목만 고려되었다. 대상 침엽수의 총개체수는 581본, 활엽수는 총 412본으로서 전체 출현개체

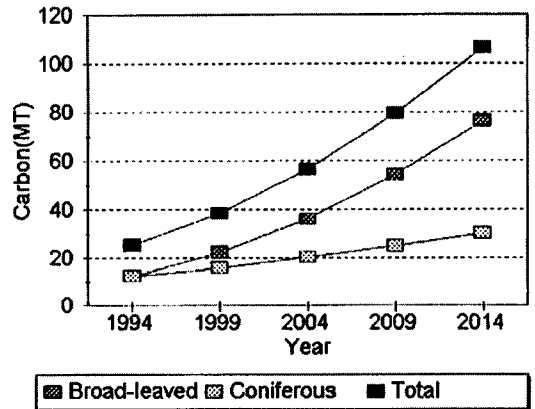


Figure 3. Cumulative amount of carbon sequestered by broad-leaved and coniferous trees until 20 years in the future*.

Note: * MT=Metric ton.

수의 약 40%를 점유하는 것이었다. 흉고직경 5cm 이하는 각종 원인에 의한 유목의 사멸율이 높아(Richards, 1979; McPherson et al., 1993) 20년후까지의 생존율이 불확실하므로 모델링에서 배제되었다. 흉고직경 26cm 이상의 교목은 해당 개체수가 극히 소수인데가(침엽수 0.9%, 활엽수 2.7%), 향후 20년 동안 성장했을때의 해당 직경의 성장율에 대한 국내 자료의 미비에 기인되어 생략되었다. 활엽수는 전체 직경급에 걸쳐 그 개체수가 침엽수보다 적음에도 불구하고, 20년후인 2014년에 약 2.5배나 더 많은 CO₂를 흡수하는 것으로 나타났다. 이유는 그만큼 활엽수의 연간 생장이 침엽수보다 크기 때문이다. 그러므로, 대기 CO₂ 농도의

최소화 견지에서 장래 식재시 침엽수종보다는 활엽수종을 선정하는 것이 바람직할 것이다. 활엽수는 2014년에 약 76.2톤을, 침엽수는 30.2톤을 각각 흡수 저장하여 이들을 합계한 잠재탄소저장량은 약 106.4톤인 것으로 예측되었다.

연구대상지내 자연지, 농경지 및 행락지를 제외한 타 도시토지이용들의 총면적 약 6.7km² 중, 식재가능한 면적은 약 2.1%인 0.14km²에 불과한 것으로 분석되었다. 이와 같이, 대상지의 도심은 인위구조물이 고밀도로 분포하고 있음을 알 수 있다. 그 잠재식재면적에 해당 토지이용들의 단위면적당(m²) 평균 탄소저장량인 0.47kg을 곱하면, 향후 식재를 통해 흡수 고정될 수 있는 탄소량은 약 66.1톤이라는 것을 추정할 수 있다. 향후 2014년까지 새로운 식재를 통해 잠재식재공간을 충분히 채운다고 가정하고, 이에 현존 교목들의 생장에 의한 잠재저장량을 가산할 때, 2014년의 총 탄소저장량은 172.5톤일 것으로 예측된다.

본 연구에서 토양에 저장된 탄소량은 계량화되지 않았으나, 그를 가산하면 대기 CO₂ 농도를 감소시키는 녹지의 역할은 더욱 클 것이다. Birdsey(1990)는 토양내에 저장된 탄소량은 삼림생태계 전체의 약 60%라고 보고하였고, Jo(1993)는 도시 주거녹지에 저장된 총탄소량 중 토양이 79-89%를 점유함을 규명한 바 있다. 도시녹지는 주요 온실가스인 대기 CO₂의 농도를 감소시키는데 뚜렷한 공헌을 하고, 예측된 장래 기후변화를 지연 혹은 완화시킬 잠재력이 적지 않다. 그러나, 현재를 포함한 20년후의 춘천시 식생구조에 의한 탄소저장량은 현재의 에너지소비에 의한 탄소배출량에 비해 훨씬 적다. 대기 CO₂ 농도의 본연의 정상화는 화석연료의 효율적 이용과 절약, 저탄소연료나 대체에너지의 개발 등 기술적 대책없이서는 불가능할 것이다. 이와 더불어, 현존 녹지의 축소 억제, 식재량의 증대, 수목의 정상적인 생육을 위한 체계적 관리 등이 병행되어야 할 것이다.

IV. 결론

본 연구의 목적은 강원도의 도청소재지인 춘천시를 대상으로 도시녹지에 의한 탄소저장과 화석연료소비에 의한 CO₂배출을 계량화하고, 대기 CO₂ 농도의 감소에 작용하는 도시녹지의 기능을 평가하기 위함이었다. 연구대상지는 전체면적의 73.2%가 자연지와 농경지인 것으로 나타났다. 교목층의 피도는 자연지에서 100m²당 약 149m², 농경지에서 0.6m², 그리고 기타 도시토지이용들에서 5-21m²이었고, 관목층의 경우는 자연지에서 94m², 기타 토지이용들에서 1-4m²이었다. 표본추출된 총 교목개체수 중 약 96%가 흉고직경 20cm 이하인 유목내지 성장과정의 수목들이었다.

식생에 의한 단위면적당 탄소저장량은 농경지 0.02kg/m², 상업지 0.13kg/m², 자연지 4.36kg/m², 그리고 기타 도시토지이용들에서 0.54kg/m²이었다. 각종 화석연료 소비로 대기에 배출되는 총탄소량은 1994년 현재 약 257,358톤이었으며, 인구 1인당 탄소배출량은 1.4톤이었다. 식생에 의해 흡수 저장된 총탄소량은 1994년 현재 총배출량의 약 17%인 42,842톤이었고, 향후 20년동안 새로운 식재를 포함하여 현존 교목(흉고직경 6-25cm 범위)의 생장에 의해 고정될 수 있는 잠재탄소량은 약 172.5톤인 것으로 추정되었다. 본 연구에서 토양에의 탄소저장량은 계량화되지 않았으나, 그를 포함한다면 녹지의 역할은 더욱 클 것으로 예측된다. 도시녹지가 주요 온실가스인 대기 CO₂의 농도를 감소시키는데 적지 않은 공헌을 하고 있으나, 예측된 기후변화를 사전에 방지하기 위한 대기 CO₂ 농도의 정상화는 식재량의 증대 및 수목의 정상적인 생육관리만으로는 미흡하며, 에너지의 효율적 이용과 절약, 저탄소연료의 개발 등 기술적인 대책의 병행을 필요로 한다.

수목에의 탄소저장량은 연구지내 수목들로부터 직접 유도된 생체량방정식들에만 의존한 것이 아니라, 타 연구에서 제시된 것들을 함께

이용하여 산정되었다. 본 연구의 한계성은 연구대상지의 모든 수종별로 충분한 표본수의 확보와 함께 벌채를 하여 생체량을 계량화할 수 없었다는 점이다. 운반형 적외선가스분석기를 이용하여 수목에 의한 연간 순탄소흡수량을 측정하는 방법을 병행한다면, 장래의 연구는 그 한계를 어느 정도 극복할 수 있을 것이다. 본 연구는 녹지에 의한 대기 CO₂의 흡수효과를 계량화한 초기연구에 지나지 않는다. 향후의 연구는 조경적인 측면에서 대기 CO₂의 농도를 최소화하기 위한 토지이용계획 및 녹지계획에 관한 응용연구를 비롯하여, 도시생태계에서의 탄소순환에 대한 이해를 돕기 위한 기초연구를 지향해야 할 것이다.

인용 문헌

1. 박완근(1987) 잣나무와 소나무의 직경생장과 Key-year에 관한 연구, 강원대학교 대학원 석사학위논문.
2. 박인협(1985) 백운산지역 천연림생태계의 삼림구조 및 물질생산에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
3. 박인협, 김준선(1989) "한국산 4개 지역형 소나무천연림의 물질 현존량 추정식에 관한 연구", 한국임학회지, 78(3): 323-330.
4. 박인협, 문광선(1994) "주요 참나무류 천연림의 물질생산 및 현존량추정식에 관한 연구", 한국임학회지, 83(2): 246-253.
5. 이경재, 박인협(1987) "경기도 광주지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질생산량과 무기영양물분포", 임산에너지, 7(1): 11-21.
6. 이수옥(1985) "강원도산 소나무천연림생태계의 Biomass 및 Net Primary Production에 관한 연구", 한국임학회지, 71: 74-81.
7. 이창복(1985) 대한식물도감, 서울: 향문사.
8. 임경빈, 김갑덕, 이경재, 김용식, 박인협, 김갑태, 이승호, 박효섭(1981) "15년생 낙엽송임분의 성장 및 생산구조", 임산에너지, 1(1): 4-12.
9. 임경빈, 이경재, 권태호, 박인협(1982) "리기다소나무 인공조림지의 물질생산량에 관한 연구", 임산에너지, 2(2): 1-12.
10. 정성호, 최문길, 이근수(1983) "중부지방 주요활엽수의 직경생장에 관한 조사연구", 한국임학회지, 60: 24-29.
11. 춘천시(1994) 춘천시 통계연보.
12. 한국종합조경공사(1979) 조경용소재도감.
13. 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.
14. 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., *Controlling Summer Heat Islands*, Vol. LBL-27872, Berkeley, CA: Lawrence Berkely Laboratory. pp. 31-44.
15. Birdsey, R. A. (1990) "Carbon budget realities at the stand and forest level", In Proceedings of the 1990 Society of American Foresters National Convention, *Are Forests the Answers?*, Bethesda, Maryland: Society of American Foresters. pp. 181-186.
16. 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.
17. 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.
18. Clark, A., and J. G. Schroeder (1977) *Biomass of Yellow-Poplar in Natural Stands in Western North Carolina*, Research Paper SE-165, Asheville, NC: USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.
19. Connolly, B. J. (1981) *Shrub Biomass-Soil Relationships in Minnesota Wetlands*, Master Thesis, University of Minnesota, Department of Soil Science.
20. Czapowskyj, M. M., D. J. Robison, R. D. Briggs, and E. H. White (1985) *Component Biomass Equations for Black Spruce in Maine*, Research Paper NE-564, USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
21. 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.
22. Detwiler, R., and C. Hall (1987) "Tropical forests and the global carbon cycle", *Science*, 239: 42-47.
23. Emanuel, W. R., H. H. Shugart, and M. P. Stevenson (1985) "Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes", *Climatic Change*, 7: 29-43.
24. Hahn, J. T. (1984) *Tree Volume and Biomass Equations for the Lake States*, Research Paper NC-250, St. Paul, MN: USDA Forest Service,

- North Central Forest Experiment Station.
25. Hansen, J., I. Fung, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy, and G. Russell (1988) "Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model", *Journal of Geophysical Research*, 93: 9341-9364.
 26. Harrington, R. A., B. J. Brown, P. B. Reich, and J. H. Fownes (1989) Ecophysiology of exotic and native shrubs in Southern Wisconsin II (annual growth and carbon gain), *Oecologia*, 80: 368-373.
 27. Jo, H. K. (1993) *Landscape Carbon Budgets and Planning Guidelines for Greenspaces in Urban Residential Lands*, Ph.D. Dissertation, University of Arizona, School of Renewable Natural Resources.
 28. Kemp, D. D. (1990) *Global Environmental Issues: A Climatological Approach*, New York: Routledge.
 29. Ker, M. F. (1980) *Tree Biomass Equations for Seven Species in Southwestern New Brunswick*, Information Report M-X-114, Fredericton, NB: Canadian Forestry Service, Maritimes Forest Research Centre.
 30. Ker, M. F., and G. D. van Raalte (1981) "Tree biomass equations for *Abies balsamea* and *Picea glauca* in northwestern New Brunswick", *Canadian Journal of Forest Research*, 11: 13-17.
 31. Korner, Ch., and U. Renhardt (1987) "Dry matter partitioning and root length/leaf area ratios in herbaceous perennial plants with diverse altitudinal distribution", *Oecologia*, 74: 411-418.
 32. Marland, G., and R. M. Rotty (1984) "Carbon dioxide emission from fossil fuels: a procedure for estimation and results for 1950-1982", *Tellus*, 36B: 232-261.
 33. McPherson, E. G., P. L. Sacamano, S. Wensman, J. Ratliff, and H. K. Jo (1993) *Modeling Benefits and Costs of Community Tree Plantings: a Demonstration Project*, Final Report to USDA Forest Service.
 34. Melillo, J. M., T. V. Callaghan, F. I. Woodward, E. Salati, and S. K. Sinha (1990) "Effects on ecosystems", In Houghton, J. T., G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums, eds., *Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press. pp. 285-310.
 35. Millikin, D. E. (1955) "Determination of bark volumes and fuel properties", *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 56(13): 106-108.
 36. Monteith, D. B. (1979) *Whole Tree Weight Tables for New York*, AERI Research Report No. 40, Syracuse, NY: State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Applied Forestry Research Institute.
 37. Nowak, D. J. (1991) *Urban Forest Development and Structure: Analysis of Oakland, California*, Ph.D. Dissertation, University of California (Berkeley).
 38. Nowak, D. J. (1993) "Atmospheric carbon reduction by urban trees", *Journal of Environmental Management*, 37: 207-217.
 39. 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: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. pp. 83-94.
 40. Ohmann, L. F., D. F. Grigal, and R. B. Brander (1976) *Biomass Equation for Five Shrubs from Northeastern Minnesota*, Research Paper NC-133, St. Paul, MN: USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
 41. Olson, J. S. (1970) "Carbon cycles and temperate woodlands", In Reichle, D. E. ed., *Analysis of Temperate Ecosystems*, Ecological Studies 1, New York: Springer-Verlag. pp. 227-241.
 42. Ovington, J. D. (1956) "The Composition of tree leaves", *Forestry* (British Journal), 29: 22-29.
 43. Phillips, D. R. (1981) *Predicted Total-Tree Biomass of Understory Hardwoods*, Research Paper SE-223, Asheville, NC: USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.
 44. Pingrey, D. W. (1976) "Forest products energy overview", In *Energy and the Wood Products Industry*, Madison, WI: Forest Products Research Society. pp. 1-14.
 45. 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.
 46. 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.
 47. Richards, N. A. (1979) "Modeling survival and consequent replacement needs in a street tree

- population", *Journal of Arboriculture*, 5(11): 251-255.
48. Richards, N. A. (1983) "Diversity and stability in a street tree population", *Urban Ecology*, 7: 159-171.
 49. Rodhe, H. (1990) "A comparison of the contributions of various gases to the greenhouse effect", *Science*, 248: 1217-1219.
 50. Roussopoulos, P. J., and R. M. Loomis (1979) *Weights and Dimensional Properties of Shrubs and Small Trees of the Great Lakes Conifer Forest*, Research Paper NC-178, St. Paul, MN: USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
 51. Rowntree, R. A., and D. J. Nowak (1991) "Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide", *Journal of Arboriculture*, 17(10): 269-275.
 52. Sampson, R. N., G. A. Moll, and J. J. Kielbaso (1992) "Opportunities to increase urban forests and the potential impacts on carbon storage and conservation", In Sampson, R. N., and D. Hair, eds., *Forests and Global Change* (Volume 1), Washington, D. C.: An American Forests Publication. pp. 51-72.
 53. Schneider, S. H. (1990) "The changing climate", In *Managing Planet Earth*, New York: W. H. Freeman and Company. pp. 25-36.
 54. Smith, W. B. (1985) *Factors and Equations to Estimate Forest Biomass in the North Central Region*. Research Paper NC-268, St. Paul, MN: USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
 55. Smith, W. B., and G. J. Brand (1983) *Allometric Biomass Equations for 98 Species of Herbs, Shrubs, and Small Trees*, Research Note NC-299, St. Paul, MN: USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
 56. Stanek, W., and D. State (1978) *Equations Predicting Primary Productivity (Biomass) of Trees, Shrubs and Lesser Vegetation Based on Current Literature*, BC-X-183, Victoria, BC: Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre.
 57. Telfer, E. S. (1969) "Weight-diameter relationships for 22 woody plant species", *Canadian Journal of Botany*, 47: 1851-1855.
 58. Tritton, L. M., and J. M. Hornbeck (1982) *Biomass Equations for Major Tree Species of the Northeast*, General Technical Report NE-69, Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
 59. USDA Forest Products Laboratory (1952) *Chemical Analysis of Wood*, Technical Note 235, Madison, WI: USDA Forest Service Forest Products Laboratory.
 60. Washington, W. M., and G. A. Meehl (1989) "Climate sensitivity due to increased CO₂: experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model", *Climate Dynamics*, 4: 1-38.
 61. Wenger, K. F. (1984) *Forestry Handbook* (2nd ed.), New York: John Wiley & Sons.
 62. Whittaker, R. H., and P. L. Marks (1975) "Methods of assessing terrestrial productivity", In Lieth, H., and R. H. Whittaker, eds., *Primary*