

강원도 일부도시의 경관내 탄소흡수 및 배출과 도시녹지의 역할

조현길

강원대학교 녹지조경학과

Carbon Uptake and Emissions in Urban Landscape, and the Role of Urban Greenspace for Several Cities in Kangwon Province

Jo, Hyun-Kil

Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University

ABSTRACT

This study quantified carbon uptake and emissions in urban landscape, and the role of urban greenspace in atmospheric carbon reduction for several cities of Chuncheon and Kangleung in Kangwon province. Mean carbon storage by trees and shrubs was 26.0 t (metric tons)/ha in Chuncheon and 46.7 t/ha in Kangleung for natural lands, and ranged from 4.7 to 6.3 t/ha for urban lands (all land use types except natural and agricultural lands) in both cities. Mean annual carbon uptake by trees and shrubs ranged from 1.60 to 1.71 t/ha/yr for natural lands, and from 0.56 to 0.71 t/ha/yr for urban lands. There was no significant difference (95% confidence level) between the two cities in the carbon storage and annual carbon uptake per ha, except the carbon storage for natural lands. Organic carbon storage in soils (to a depth of 60 cm) of Chuncheon averaged 24.8 t/ha for urban lands and 31.6 t/ha for natural lands, 1.3 times greater than for urban lands. Annual carbon accumulation in soils was 1.3 t/ha/yr for natural lands of the study cities. Annual per capita carbon emissions from fossil fuel consumption were 1.3 t/yr in Chuncheon and 1.8 t/yr in Kangleung. The principal carbon release in urban landscapes was from transport and industry. Total carbon storage by urban greenspace (trees, shrubs, and soils) equaled 66% of total carbon

emissions in Chuncheon and 101% in Kangleung. Carbon uptake by urban greenspace annually offset total carbon emissions by approximately 4% in the study cities. Thus, urban greenspace played a partial important role in reducing atmospheric CO₂ concentrations. To increase CO₂ uptake and storage by urban greenspace, suggested are conservation of natural lands, minimization of hard surfaces and more plantings, selection of tree species with high growth rate, and proper management for longer healthy tree growth.

Key Words: climate change, CO₂ cycling, land uses, vegetation and soils, energy

1. 서론

온실효과 및 기후변화는 현재 가장 심각한 세계 환경관심사 중의 하나이다. 온실효과를 야기시키는 주요 개스는 CO₂, CH₄, CFCs, N₂O, 대류권의 O₃, 성층권의 수증기 등이다(Ciborowski, 1989; Ramanathan, 1989). 이들 온실개스 중, CO₂는 기후변화를 야기시키는데 있어 단독으로 약 50%의 영향력을 발휘하는 개스로서(Ciborowski, 1989; Rodhe, 1990), 기후변화와 관련하여 집중적인 연구의 대상이 되어 왔다. 대기 CO₂의 현 농도는 산업화 이전의 280ppm으로부터 약 25% 증가하였으며 연 증가율은 0.4%로 추정된다(Post *et al.*, 1990). 「이와 같은 CO₂ 농도의 증가는 석탄, 석유, 개스 등 화석연료의 사용과 무분별한 삼림 벌채에 기인된다(Detwiler and Hall, 1987; Schneider, 1990). 기후변화는 향후 자연생태계와 사회경제적 시스템에 현저한 악영향을 미칠 것으로 예측된다(Kemp, 1990; Melillo *et al.*, 1990; Karl *et al.*, 1997)」.

대기 CO₂ 농도의 저감을 위한 노력은 최근 도시녹지의 그 효과를 검토하는 연구들을 태동시켰다. Nowak(1993; 1994)은 미국 California주의 Oakland시와 Illinois주의 Chicago시에 식재된 수목의 탄소저장량을 산정하고, 그에 근거하여 미국전체 도시수목에 의한 대기탄소농도의 감소효과를 검토하였다. Jo와 McPherson(1995)은 Chicago시 주거지역에서의 탄소순환을 모델링하고 대기탄소농도의 저감을 위한 녹지계획 및 관리 전략을 제시하였다. 「McPherson(1998)은 California주의 Sacramento시를 대상으로 에너지소비에 기인된 연간 탄소배출을 상쇄시키는 도시녹지의 가치를 규명하였다. 국내에서는 조현길 등(1995; 1998b)이 춘천시를 대상으로 도시녹지에 의한

탄소저장과 에너지절약을 계량화하고, 대기 CO₂ 농도의 감소에 작용하는 도시녹지의 기능을 평가한 바 있다. 그러나, 도시녹지에 의한 연간 탄소흡수의 역할과 도시경관내 CO₂ 순환에 관한 국내의 연구들은 아직 초보단계에 머물고 있다」.

도시경관을 구성하는 식생은 광합성을 통한 성장의 과정에서 해마다 대기의 탄소를 흡수 및 축적하며, 그 일부는 생장기반인 토양에 유입되어 분해되기 전까지 잔재한다. 한편, 도시경관내 주택, 공장, 자동차 등은 화석연료의 소비를 통해 대기에 탄소를 배출한다. 본 연구의 목적은 강원도의 일부 도시들을 대상으로, 도시녹지에 의한 대기탄소의 저장 및 연간 흡수를 비롯하여 에너지소비에 의한 대기로의 탄소배출을 계량화하여, 도시경관내 탄소흡수 및 배출의 양적 관계와 도시녹지의 탄소농도저감 역할을 파악하는 것이었다. 본 논문에서의 도시녹지란 농경지를 제외한 도시의 교목, 관목 및 초본식물 자체를 포함하여 그들의 식재 및 생장이 가능한 토양면을 지칭한다. 수목의 탄소저장량이란 수목이 생장하면서 여러 해 동안 축적한 탄소량을 의미하는 것으로서, 한해 동안 흡수한 연간 탄소흡수량과는 구별된다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구대상도시 선정

본 연구는 강원도내 도시들 중, 행정적으로 강원도의 영서 및 영동지역을 각각 대표하고 기후조건이 상이한 춘천 및 강릉을 연구대상도시로 선정하였다. 본 연구대상인 춘천 및 강릉시는 시·군 통합 이전의 행정구역 전체를 일컫는다.

2. 식생조사 및 토지이용분석

축척 1/10,000의 지형도상에서 토지이용유형을 고려한 계층적 체계표본추출(stratified systematic sampling)에 의해, 춘천시 총 234개 및 강릉시 271개의 식생표본추출지점을 선정하였다. 표본추출지점별 현지답사를 통해 각 토지이용유형에 적정하다고 판단된 방법들(조현길 등, 1998a)을 적용하여 식생조사를 실시하였다. 조사항목은 수종, 흉고직경(흉고직경 2cm 이하의 관목은 지상 15cm 부위의 근원직경), 수고, 수관폭 및 수관고, 피도 등이었다. 이들 자료는 토지이용유형별 단위면적당 식생의 탄소저장 및 연간 탄소흡수량 평균치를 산정하는데 이용되었다.

축척 1/15,000의 흑백항공사진상에서 체계적 표본추출(systematic sampling)을 통해(조현길 등, 1998a), 춘천시 총 2,392개 및 강릉시 2,823개의 표본추출지점을 선정하고 해당지점의 토지이용유형을 판독하였다. 도시 총면적에 대한 토지이용유형별 구성비와 면적을 분석하고, 이를 토지이용별 녹지의 탄소저장 및 연간 탄소흡수 총량을 산정하는데 활용하였다.

3. 식생의 탄소저장 및 연간 탄소흡수량 산정

1) 탄소저장량

수목의 탄소저장을 계량화하기 위해, 춘천시에서 성장하는 주요수종들(조현길 등, 1998a)의 지상부 생체량을 측정하고 생체량방정식을 유도하였다. 대상수종은 교목 4종과 관목 5종이었다. 교목으로서는 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 참나무류(*Quercus mongolica* & *Q. aliena*) 및 현사시(*Populus tomentiglandulosa*) 각각 10개체, 총 40개체를 벌목하였다. 관목으로서는 소나무류(*Pinus densiflora* & *P. rigida*) 54개체, 신갈나무(*Quercus mongolica*) 59개체, 철쭉(*Rhododendron schlippenbachii*) 45개체, 진달래(*Rhododendron mucronulatum*) 60개체, 싸리(*Lespedeza bicolor*) 59개체 등 총 277개체를 벌목하였다. 「교목의 소나무, 잣나무 및 참나무류는 강원대학교 봉명학술림내에서, 그리고 현사시는 강원대학교 구내에 식재된 개체들을 대상으로 임의표본추출되었다. 관목들은 자연지의 식생표본추출지점들을 중심으로 분산 벌목되었다」.

대상교목들은 지상 10-15cm 높이에서, 그리고 관목들은 지면부위에서 가을 낙엽되기 전에(현사시는 늦겨울에) 벌목되었다. 교목의 경우, 벌목 직후 현장에서 각 개체들의 수간 및 가지의 생증량을 측정된 후, 흉고부위에서 5-10cm 두께의 수간 원판(圓板)과 0.5-1kg의 가지를 표본채취하였다. 그들을 65°C에서 향량이 될 때까지 건조시켜 건증량을 측정하고, 수간 및 가지의 생증량대 건증량의 비를 구하여 교목개체별 전체의 건증량을 산정하였다. 관목의 경우, 벌목 직후 각 개체의 지상부 전체를 이중 비닐백에 넣어 실험실로 운반하여, 생증량을 측정하고(벌목 후 4시간 이내에 측정) 수종별로 10개체를 임의표본추출하였다. 그들을 65°C하의 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시켜 건증량을 측정하고, 각 수종의 생증량대 건증량의 평균비를 산출하였다. 상기의 측정자료에 근거하여 수종별 생체량방정식(상대생장식)을 구하고, 연구대상도시에서 현지조사한 해당수종의 지상부 생체량을 산정하였다. 생체량방정식의 유도에 있어서는 흉고직경 또는 근원직경과 수고를 독립변수로 하되, 반복적인 선형 및 비선형 접근을 시도하여 가장 적합한 회귀식과 변수를 최종 결정하였다.

기타 수종의 총생체량과 전기한 벌목수종의 지하부 생체량은 벌목 및 근굴취의 난이성에 기인되어 다수의 타연구에서 제시한 생체량방정식을 이용하여 산정되었다(Table 1 참조). 수목의 생체량은 동일 수종이라도 수목생장을 좌우하는 성장지역의 각종 환경조건에 따라 상이할 수 있다. 그러므로, 타연구에 의한 생체량방정식의 이용은 그 방정식이 유도된 수목직경급 범위내의 개체에 한정되었고, 개체별로 단 하나의 생체량방정식만을 적용하기보다는 가급적 다수(최대 5개)의 방정식을 이용한 평균생체량을 구하여, 가능한 한 산정치의 신뢰성을 증진하는데 주력하였다. 생체량방정식을 구할 수 없는 특정수종의 경우는 동일 속(genus) 또는 그룹(활엽수 또는 침엽수)의 방정식들을 대용하여 평균생체량을 산정하였다. 「수목의 목질부 및 엽의 평균탄소함량은 건증량의 약 50%이므로(Ovington, 1956; Reichle et al., 1973; Pingrey, 1976; Ajtay et al., 1979; Chow and Rolfe, 1989; 송철영 등, 1997), 수목개체별 총생체량은 0.5를 곱하여 탄소량으로 전환되었다」.

Table 1. Sources of biomass equations used to calculate biomass of trees and shrubs

Species	Diameter range(cm)*	Reference
<i>Abies</i> spp.	2.5-40.0(DBH)	Stanek and State(1978)
	0.5-3.3(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
<i>Acer</i> spp.	1.0-30.0(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	1.1-40.5(DBH)	Ker(1980)
	1.5-28.5(DBH)	Park(1985)
	2.5-66.0(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	2.5-66.0(DBH)	Wenger(1984)
	0.3-4.3(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
	**	Whittaker and Marks(1975)
<i>Alnus</i> spp.	0.8-4.1(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
<i>Betula</i> spp.	1.0-23.0(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	2.5-50.0(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	2.5-66.0(DBH)	Wenger(1984)
	0.3-2.3(DAG)	Connolly(1981)
	0.5-3.3(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
	**	Whittaker and Marks(1975)
<i>Cornus</i> spp.	1.5-28.5(DBH)	Park(1985)
	2.5-12.4(DBH)	Phillips(1981)
	0.3-3.6(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
	0.7-3.3(DAG)	Harrington <i>et al.</i> (1989)
<i>Corylus</i> spp.	0.3-2.5(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
<i>Crataegus</i> spp.	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), and Phillips(1981)
<i>Fraxinus</i> spp.	0.9-27.9(DBH)	Ker(1980)
	1.5-28.5(DBH)	Park(1985)
	5.1-50.8(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
<i>Juglans</i> spp.	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), and Phillips(1981)
<i>Juniperus</i> spp.	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), and Phillips(1981)
	0.8-2.9(DAG)	Smith and Brand(1983)
<i>Larix leptolepis</i>	4.7-15.2(DBH)	Yim <i>et al.</i> (1981)
<i>Liriodendron tulipifera</i>	2.5-50.0(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
<i>Picea</i> spp.	1.5-17.7(DBH)	Ker and van Raalte(1981)
	2.5-66.0(DBH)	Wenger(1984)
	1.0-3.0(DAG)	Czapowskyj <i>et al.</i> (1985)
	2.5-66.0(DBH)	Wenger(1984)
<i>Pinus</i> spp.	2.8-32.3(DBH)	Wenger(1984)
	4.1-10.9(DBH)	Yim <i>et al.</i> (1982)
	9.3-20.8(DBH)	Lee and Park(1987)
	10.0-45.0(DBH)	Park and Lee(1990)
	2.5-66.0(DBH)	Wenger(1984)
	2.8-32.3(DBH)	Wenger(1984)
<i>Platanus occidentalis</i>	25.5-60.5(DBH)	Jo <i>et al.</i> (1995)

Table 1. continued

Species	Diameter range(cm)*	Reference
<i>Populus</i> spp.	4.5-33.0(DBH)	Stanek and State(1978)
	14.1(DBH)^	Choi and Park(1993)
	0.5-3.3(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
	**	Whittaker and Marks(1975)
<i>Prunus</i> spp.	1.0-10.0(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	2.5-15.0(DBH)	Stanek and State(1978)
	2.5-22.9(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	0.7-2.9(DAG)	Harrington <i>et al.</i> (1989)
	0.8-3.8(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
	**	Whittaker and Marks(1975)
<i>Quercus</i> spp.	1.5-28.5(DBH)	Park(1985)
	6.9-18.6(DBH)	Lee and Park(1987)
	11.7(DBH)^	Park <i>et al.</i> (1996)
	14.9(DBH)^	Park <i>et al.</i> (1996)
	15.0(DBH)^	Park <i>et al.</i> (1996)
	21.3(DBH)^	Park <i>et al.</i> (1996)
	0.2-4.0(DAG)	Telfer(1969)
<i>Rhododendron</i> spp.	0.3-1.1(DAG)	Telfer(1969)
<i>Rosa</i> spp.	0.2-1.2(DAG)	Smith and Brand(1983)
<i>Salix</i> spp.	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), and Phillips(1981)
	0.3-3.0(DAG)	Connolly(1981)
	0.7-3.8(DAG)	Ohmann <i>et al.</i> (1976)
<i>Spiraea</i> spp.	0.3-1.3(DAG)	Connolly(1981)
<i>Thuja</i> spp.	2.2-30.2(DBH)	Ker(1980)
	2.5-10.0(DBH)	Stanek and State(1978)
	0.3-5.1(DAG)	Roussopoulos and Loomis(1979)
<i>Ulmus</i> spp.	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), and Phillips(1981)
	45.7-96.5(DBH)	Jo(1993)
<i>Viburnum</i> spp.	0.3-1.6(DAG)	Smith and Brand(1983)
	0.3-3.1(DAG)	Smith and Brand(1983)
General hardwoods	1.5-28.5(DBH)	Park(1985)
	2.5-15.2(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	2.5-25.4(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	<12(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	>10(DBH)	Tritton and Hornbeck(1982)
	25.4-99.1(DBH)	Jo(1993)
	**	Whittaker and Marks(1975)
General softwoods	2.5-55.0(DBH)	Monteith(1979)
	<12.7(DBH)	Hahn(1984), Smith(1985), and Phillips(1981)

Note: * DAG indicates diameter at 15cm above ground

** It includes various diameter sizes from seedlings to trees.

^ It is mean value.

자연지 초본식물의 경우, 춘천시 식생표본추출지점들의 일부(N=34)에서 $1 \times 1\text{m}$ 크기의 방형구를 설치하고, 그 방형구내에 존재하는 초본의 지상부 전체를 수확하였다. 수확 직후, 현장에서 생중량을 측정하고 표본들을 비닐백에 넣어 실험실로 운반하였다. 그들을 65°C 하의 건조기에서 24시간 동안 건조시켜 건조량을 측정하였다. 초본식물의 지하부 생체량은 지상부 생체량을 1.39로 나누어 산정되었고(Korner and Renhardt, 1987), 총생체량은 0.45를 곱하여 탄소저장량으로 전환되었다(Olson, 1970; Ajtay *et al.*, 1979).

2) 연간 탄소흡수량

도심지(자연지 및 농경지를 제외한 도시의 타토지이용을 지칭)에 식재된 낙엽활엽교목종의 연간 탄소흡수는, 운반형 적외선가스분석기(ADC의 LCA-4)에 의한 CO_2 교환율의 측정으로부터 유도된 연간 탄소흡수량 산정회귀식(조현길과 조동하, 1998)을 이용하여 계량화되었다. 도심지의 기타 수종과 자연지의 수목에 의한 연간 탄소흡수는 수종별 연간 직경생장률과 생체량 방정식을 적용하여 계량화되었다. 즉, 수목의 연간 직경생장률로부터 조사 전년도와 후고직경 또는 근원직경을 파악하고, 이 직경변수를 전기한 생체량방정식에 대입하여 전년도의 생체량을 산정하였다. 조사년도의 생체량에서 전년도의 생체량을 제감하여 연간 증가된 생체량을 구하고 이를 탄소량으로 전환하였다. 「낙엽은 대부분 수거와 분해를 통하여 해마다 대기에 탄소를 환원하게 되므로, 상록침엽수종은 3년간의 엽수명을 가정하여(Dirr, 1977; Rowntree and Nowak, 1991) 25%의 엽량을, 낙엽수종은 낙엽 전량을 각각 연간 탄소흡수량에서 제감하였다」.

생체량 측정을 위해 별목한 소나무, 잣나무 및 참나무류의 후고직경생장률은, 표본채취한 각 수간 원판의 4개 직각방향의 생장률 측정치를 평균하여 산출되었다. 소나무와 잣나무의 그 측정치는 수목의 엽급 및 표본추출수의 보강차원에서, 강원대학교 학술림내의 동일수종을 대상으로 연구된 기존의 직경생장률(박완근, 1987)과 종합 평균되었다. 그리고 그 평균치를 전년도의 후고직경 산정에 적용하였다. 참나무류의 기타 낙엽활엽수종의 경우, 국내 중부지방에서 생장하는 수목들의 수종별 후고직경생장률(정성호 등, 1983)을 활용하였다.

직경생장률을 구할 수 없는 특정수종의 경우는 동일 속 또는 그룹의 평균 직경생장률을 대용하였다. 관목의 근원직경생장률은 국내의 관련 연구가 부재하여, 미국의 도십지(Jo, 1993) 및 자연지(Whittaker, 1962; Whittaker and Woodwell, 1968; Whittaker and Marks, 1975; Harrington *et al.*, 1989)의 수목을 대상으로 연구된 결과들에 의존하였다.

4. 토양의 탄소저장 및 유동량 산정

토양에 저장된 유기탄소량을 산정하기 위해, 직경 5.1cm의 다층토양표본추출기(AMS의 multi-stage core soil sampler)를 이용하여 가을에 깊이 60cm까지의 토양표본을 채취하였다. 토양표본들은 춘천시의 식생표본추출지점들 중, 도심지와 자연지에서 각각 30개, 총 60개의 임의지점에서 채취되었다. 여기에서, 도심지는 단독 및 다세대주거지, 시설우점의 공공용지 및 공원, 가로식재지 등을 포함한다. 「채취한 토양표본들을 1주일 동안 음건시켜 직경 2mm의 체(sieve)로 정선하고 그 무게를 0.1g까지 측정 후, 각 표본별로 Walkley-Black 방법(Jackson, 1958)에 의해 유기탄소함량을 분석하였다. 또한, 농촌진흥청(1988)의 표준방법에 따라 수분, 산도, 전질소, 유효태인산, 치환성양이온, 양이온치환능 등의 물리 화학적 특성을 분석하였다」.

수목의 낙엽, 낙지 및 낙근에 의한 자연지 토양에의 탄소유입과 그들의 분해를 통한 대기에의 탄소유출을 기존의 국내의 연구결과들에 근거하여 계량화하였다. 즉, 단위면적당 연간 낙엽 및 낙지량은 국내 중부지방의 침엽수 및 활엽수림을 대상으로 연구된 결과치들(이경재와 박인현, 1987; 허성두, 1987; 김종성 등, 1996)을 평균하고 탄소량으로 전환되었다. 낙근에 기인한 토양내 탄소유입량의 산출은 국외 여러지역 온대림에서의 연구결과들을 종합하여 유도된 수목의 지상부대 지하부의 탄소유입량비(Reiners, 1973)를 적용하였다. 분해에 의한 토양으로부터의 단위면적당 연간 탄소유출량은 온대지역내 낙엽, 낙지 및 낙근의 연간 분해율(Reichle *et al.*, 1973; Ajtay *et al.*, 1979; Edwards *et al.*, 1989; Vogt *et al.*, 1991)을 바탕으로 산정되었다. 「토양에의 연간 탄소유입량에서 분해에 의한 연간 유출량을 제감하여 토양내 연간 탄소축적량을 추정하였다」.

5. 에너지소비량 조사 및 탄소배출량 산출

연구대상도시내 시민들이 연간 소비하는 전기, 석유, 가스, 연탄 등의 용도별 화석에너지 총량을, 통계자료(춘천시, 1997; 강릉시, 1997)의 수집을 비롯하여 시청, 한국전력공사 및 해당 에너지 취급처를 방문하여 파악하였다. 각 에너지별 소비량은 탄소배출계수 관련 문헌들(에너지관리공단, 1996; 권태규, 1998)을 참조하여 대기예의 탄소배출량으로 전환되었다. 전기의 경우, 공급된 총전력 중 수력, 원자력 및 화력의 전력원별 구성비를 파악한 후, 화력발전은 석탄, 석유 및 개스로부터의 발전량 구성비(한국전력공사와의 사신, 1997)를 산출하여, 1kWh의 소비전력당 탄소 0.22kg의 비율로 탄소배출량을 산정하였다. 원자력 및 수력발전에 의한 탄소배출은 극히 저량이므로 그 산정에서 제외되었다. 석유소비에 의한 탄소배출량 산정은 1리터당 휘발유 0.63kg, 등유 0.68kg, 경유 0.73kg 및 B-C유 0.82kg의 배출계수를 적용하였다. 개스류의 경우, 도시가스(천연가스)는 1m³의 소비당 0.64kg, 프로판 및 부탄은 1kg의 소비당 각각 0.82kg 및 0.83kg의 탄소배출계수를 이용하였다. 연탄소비로부터의 탄소배출량은 1kg의 소비당 0.48kg의 배출계수를 활용하여 산출되었다.

III. 결과 및 고찰

1. 토지이용 및 식생현황

「1995년 12월말 기준, 총면적은 춘천시 52km² 및 강릉시 76km²이었고, 인구밀도는 춘천시 35인/ha 및 강릉시 21인/ha이었다(춘천시, 1997; 강릉시, 1997). 연평균기온 및 평균연강수량(1991-1995년)은 춘천시가 각각 11.0°C, 1,217mm, 강릉시가 각각 13.2°C, 1,327mm이었다. 이처럼, 강릉시가 춘천시보다 강우량이 많고 온도는 약 2°C 높았다. 양 도시의 토지이용구성은 유사하였으며, 자연지 및 농경지가 총면적의 75-80%를 차지하는 주요 토지이용유형이었다. 주거지는 약 10%를, 교통 및 상공업지는 5-10%를 각각 점유하였으며, 공공용지, 행락지 등의 점유율은 5% 미만이었다.

교목밀도는 양 도시간 별 차이없이 자연지 약 10주/100m², 도심지 1.5주/100m²이었다. 도심지의 수목

(교목 및 관목)피도 역시 유사하게 춘천시 약 12%, 강릉시 13%이었으나, 자연지의 교목기저면적은 강릉시가 춘천시의 1,103cm²/100m²보다 약 2배 큰 것으로 나타났다. 연구대상도시들은 유목내지는 성장과정의 교목들이 우점하는 단령구조를 보였다. 흉고직경 30cm 이하의 교목이 자연지에서 95-100%, 도심지에서 94-98%를 차지하였다. 출현수종간 상대우점치는 도심지에서 춘천시의 경우 은행나무(*Ginkgo biloba*)가, 강릉시의 경우 감나무(*Diospyros kaki*)가 가장 높았고, 자연지에서는 양 도시 모두 소나무가 가장 높았다(조현길 등, 1998a).

2. 수목의 탄소저장 및 연간 탄소흡수량

Table 2는 연구대상도시들의 토지이용별 수목에 의한 단위면적당 탄소저장 및 연간 탄소흡수량을 보여 준다. 수목의 단위면적당 탄소저장량은 토지이용유형들 중 식생우점의 자연지에서 현저하게 많았다. 자연지의 평균탄소저장량은 춘천시 26.0±2.7(표준오차)t/ha, 강릉시 46.7±3.9t/ha로서, 강릉시가 춘천시보다 약 1.8배 많았다. 그 이유는 단위면적당 수목기저면적이 강릉시에서 춘천시보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 자연지를 제외한 주거지, 상공업지, 시설우점의 공공용지 및 행락지 등 타토지이용, 즉 도심지에서의 평균탄소저장량은 춘천시 4.7±0.7t/ha, 강릉시 6.3±0.8t/ha이었다. 「도심지의 단위면적당 탄소저장량은 95% 수준의 신뢰구간(춘천 ±1.5, 강릉 ±1.7)에서 양 도시간 유의한 차이가 없었다. Nowak(1994)은 미국 Chicago시의 자연지 및 도심지에서 수목의 탄소저장량이 각각 약 35.5t/ha 및 13.5t/ha이었음을 보고한 바 있다. 이와 비교하면, 본 연구대상도시들의 저장량 평균은 자연지의 경우 비슷하나, 도심지에서는 1/2 정도 적은 것으로 분석된다.

수목의 평균 연간 탄소흡수량은 자연지의 경우 춘천시 1.71±0.17t/ha/yr 및 강릉시 1.60±0.09t/ha/yr 이었고, 도심지의 경우 춘천시 0.56±0.08t/ha/yr 및 강릉시 0.71±0.10t/ha/yr이었다. 단위면적당 연간 탄소흡수량은 자연지가 도심지보다 2-3배 많았으나, 자연지 및 도심지 모두 양 도시간 95% 수준의 신뢰구간에서 유의한 차이가 없었다. 「Jo and McPherson(1995)의 연구결과에 의하면, 미국 Chicago시 일부

Table 2. Carbon storage (t/ha) and annual carbon uptake (t/ha/yr) by woody plants for each land use type in study cities (t: metric tons)*

Land use	Chuncheon				Kangleung					
	N	Storage		Uptake		N	Storage		Uptake	
		Mean	SE	Mean	SE		Mean	SE	Mean	SE
Residential										
Urban detached	28	3.0	0.7	0.49	0.13	13	1.4	0.4	0.17	0.04
Suburban detached	18	10.5	3.4	0.90	0.27	55	7.6	1.2	1.03	0.17
Multifamily	12	3.1	0.8	0.31	0.08	5	2.6	0.8	0.25	0.05
Commercial & industrial	20	5.4	1.7	0.38	0.12	10	3.8	1.3	0.31	0.10
Institutional**	14	5.6	1.5	0.53	0.14	13	11.6	3.1	0.71	0.19
Recreational**	5	16.7	6.1	1.81	0.64	3	-	-	-	-
Natural	42	26.0	2.7	1.71	0.17	65	46.7	3.9	1.60	0.09
Other^	10	0.5	0.2	0.08	0.03	9	3.5	1.2	0.10	0.03
All urban^^	107	4.7	0.7	0.56	0.08	108	6.3	0.8	0.71	0.10

Note: * SE indicates standard error.

** It excludes forested areas and natural parks, which are included in natural land.

^ It includes vacant areas and banks.

^^ It indicates all land use types except natural and agricultural lands.

주거지에서의 연간 탄소흡수량은 0.7t/ha/yr이었는데, 그 주거지와 비슷한 수목피도(12-13%)를 보인 본 연구대상도시들 도심지도 유사한 연간 탄소흡수량을 나타냈다.

Table 3은 자연지 수목(현사시는 도심지 수목)의 지상부생체량 및 탄소량을 산정하기 위해 유도된 수종별 생체량방정식을 제시한다. 방정식들의 R²은 교목의 경우 0.96-0.99. 관목의 경우 0.71-0.90으로서 그들의 적합도가 높은 것으로 해석된다. 방정식이 유도된 교목들의 흉고직경 범위는 수종에 따라 상이하나 최소 4cm에서 최대 27cm까지, 그리고 관목들의 근원직경 범위는 최소 0.4cm에서 최대 4.0cm까지 분포하였다. 「교목들의 평균수령은 잣나무 14년생, 소나무 20년생, 그리고 참나무류 29년생이었다. 성장 전년에 걸친 평균 연간 흉고직경성장률은 잣나무 0.75 ± 0.08(표준오차) cm, 소나무 0.51 ± 0.03 cm, 참나무류 0.38 ± 0.04 cm 등으로서, 가장 어린 잣나무의 직경성장률이 가장 높았다.

한편, 춘천시 주변에서 성장하는 40년생의 잣나무 및 소나무를 대상으로 한 기존의 연구결과(박완근,

1987)와 본 연구의 결과를 종합 평균한 연간 흉고직경성장률은, 성장 전년에 걸쳐 잣나무 0.35cm(N=170) 및 소나무 0.30cm(N=170)이었다. 이들 2개 수종의 평균 연간 직경성장률은 0.33cm(N=340)이었다. 정성호 등(1983)에 따르면, 국내 중부지방에서 성장하는 자작나무(*Betula platyphylla*), 층층나무(*Cornus controversa*), 들메나무(*Fraxinus mandshurica*) 등을 비롯한 40-65년생 여러가지 활엽수종의 성장 전년에 걸친 평균 연간 흉고직경성장률은 0.68cm(N=734)이었다. 즉, 활엽수의 직경성장률은 상기한 침엽수의 0.33 cm 보다 2배 큰 것으로 분석된다. 「미국 도심지에서, 관목성 침엽수(*Juniperus* spp., *Taxus* spp., *Thuja* spp. 등)의 평균 연간흉고직경성장률은 0.26 cm, 그리고 관목성 활엽수(*Syringa* spp., *Cornus* spp. 등)의 경우는 0.42cm이었다(Jo, 1993). 기타 소관목의 연간 근원직경성장률은 도심지에서 0.08cm(Jo, 1993), 자연지에서 0.05cm(Whittaker, 1962; Whittaker and Woodwell, 1968; Whittaker and Marks, 1975; Harrington et al., 1989)이라고 보고되었다.

Table 3. Biomass equations generated to calculate total above-ground biomass of common tree and shrub species in Chuncheon

	Species	Equations*	R ²	N	Diameter(cm)
Tree	<i>Pinus densiflora</i>	$\ln DW(\text{kg}) = -1.8436 + 2.1199 \ln DBH$	0.98	10	4.3-26.0
	<i>Pinus koraiensis</i>	$\ln DW(\text{kg}) = -2.9097 + 2.5362 \ln DBH$	0.99	10	5.0-22.0
	<i>Populus tomentiglandulosa</i> **	$DW(\text{kg}) = -77.58 + 10.05 DBH$	0.98	10	8.3-23.8
	<i>Quercus mongolica & aliena</i>	$\ln DW(\text{kg}) = -3.2648 + 0.9828 \ln DBH^2 H$	0.96	10	5.2-26.5
	General softwoods [^]	$\ln DW(\text{kg}) = -2.2796 + 2.2874 \ln DBH$	0.98	20	4.3-26.0
Shrub	<i>Lespedeza bicolor</i>	$\ln DW(\text{g}) = 4.4155 + 1.8061 \ln DAG$	0.82	59	0.4- 2.5
	<i>Pinus densiflora & rigida</i>	$\ln DW(\text{g}) = 4.0685 + 2.1892 \ln DAG$	0.90	54	0.6- 3.6
	<i>Quercus mongolica</i>	$\ln DW(\text{g}) = 4.2763 + 2.2189 \ln DAG$	0.90	59	0.5- 4.0
	<i>Rhododendron mucronulatum</i>	$\ln DW(\text{g}) = 3.8212 + 2.3652 \ln DAG$	0.87	60	0.5- 3.4
	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	$DW(\text{g}) = -133.28 + 181.74 DAG$	0.71	45	0.4- 2.6
	General hardwoods ^{^^}	$\ln DW(\text{g}) = 4.1813 + 1.9494 \ln DAG$	0.77	223	0.4- 4.0

Note: [^] DW=Dry weight, H=Height (m), DAG=Diameter at 15cm above ground

^{**} Leaf biomass excluded

[^] *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

^{^^} *Lespedeza bicolor*, *Quercus mongolica*, *Rhododendron mucronulatum*, and *Rhododendron schlippenbachii*

교목의 단위피도당 연간 탄소흡수량은 도심지에서 0.45(춘천)-0.53(강릉) kg/m² 이었고, 자연지에서 0.13(춘천)-0.14(강릉) kg/m² 이었다. 이와 같이, 단위 피도당 연간 탄소흡수량은 도심지 교목이 자연지 교목보다 더 많은 것으로 나타났다. 그 이유는 도심지에선 성장과 관련된 경합의 영향이 자연지에 비해 적고, 대체로 생장력이 양호한 수종이 분포하기 때문인 것으로 사료된다. 도심지 활엽교목의 연간 탄소흡수량 회귀식(조현길과 조동하, 1998)에 의한 산정치(심하게 전경되지 않을 경우)를, 자연지 활엽교목의 평균 연간 직경생장률(0.68cm) 및 생체량 방정식들(Table 1 참조)의 적용에 의한 연간 탄소흡수량과 비교하였다. 그 결과, 도심지 단풍나무(*Acer palmatum*)의 연간 탄소흡수량은 동일 직경급내에서 자연지의 것에 비해 평균 1/2 정도 적었으나, 은행나무, 느티나무(*Zelkova serrata*), 플라타너스(*Platanus occidentalis*) 등을 포함하는 타 활엽수종의 연간 탄소흡수량은 도심지에서 약 2배 더 많았다.

3. 토양의 탄소저장 및 유동량

춘천시의 토성은 대체로 자갈이 있는 양토 내지는

사양토인 것으로 분류된다(농촌진흥청, 1986). Table 4에서 보듯이, 자연지의 토양 산도는 평균 5.0으로서 한국 산림토양의 평균치인 5.5(이수욱, 1981)보다 낮았으며, 도심지의 경우는 중성에 가까운 6.6이었다. 유기물 함량은 자연지가 1.0%, 도심지가 0.5-0.7%로서, 한국 산림토양의 평균치인 3.2%(이수욱, 1981)보다 훨씬 적었다. 「유효태인산은 도심지가 자연지보다 훨씬 많았으며, 자연지의 경우도 51.6mg/kg으로서 한국 산림토양의 평균치인 26.7mg/kg(이수욱, 1981)보다 약 2배 많았다. 양이온치환능은 자연지가 8.6cmol(+)/kg, 그리고 도심지가 약 5.0cmol(+)/kg으로서, 한국 산림토양의 평균치인 11.3cmol(+)/kg(이수욱, 1981)보다 낮았다」.

춘천시 토양의 단위면적당 평균 유기탄소저장량은 자연지에서 31.6±1.6(표준오차)t/ha, 도심지에서 24.8±1.6t/ha로서, 자연지가 도심지보다 약 1.3배 더 많았다. 도심지에 저장된 유기탄소량은 토심 30cm까지는 16.2±1.2t/ha, 30-60cm까지는 8.6±0.9t/ha로서, 표토의 탄소량이 심토의 경우보다 약 2배 더 많았다. 「한편, 미국 Chicago시 주거지에서의 유기탄소저장량(토심 60cm까지)은 162.7t/ha이었고(Jo and McPherson, 1995), 미국 중북부 및 동북부지역 산림

Table 4. Physical and chemical characteristics of urban and natural soils in Chuncheon

Land use	Depth (cm)	Moisture (%)	pH	OM (%)	Total N (%)	Available P ₂ O ₅ (mg/kg)	EC* (cmol(+)/kg)				CEC**
							K ⁺	Ca ⁺⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	
Urban [^]	0-30	9.0	6.6	0.7	0.2	224.9	0.02	0.56	0.15	0.03	5.0
	30-60	7.7	6.6	0.5	0.1	166.7	0.02	0.57	0.14	0.03	5.1
Natural	0-60	8.3	5.0	1.0	0.2	51.6	0.02	0.11	0.14	0.02	8.6

Note: * Exchangeable cation

** Cation exchange capacity (cmol(+)/kg)

[^] It indicates all urban land uses except natural and agricultural lands.

토양의 경우는 130-160t/ha인 것으로 보고되었다 (Birdsey, 1992). 춘천시의 단위면적당 유기탄소저장량은 도심지에서는 미국의 15.2%, 자연지에서는 21.8%에 불과한 것으로 분석된다.

국내 중부지방의 자연지에서 낙엽과 낙지에 의한 토양에의 연간 탄소유입량은 평균 약 2.5t/ha/yr(건중량은 5t/ha/yr)이었다(이경제와 박인협, 1987; 허성두, 1987; 김종성 등, 1996). 미국 및 유럽내 여러지역 온대림에서의 지상부에 의한 연간 탄소유입량도 유사하게 평균 2.6t/ha/yr인 것으로 나타났다(Edwards *et al.*, 1989). 국외 온대림에서의 낙근에 의한 토양내 탄소유입량은 지상부 유입량의 약 25%이었다(Reiners, 1973). 이 비율에 근거하면, 수목의 지상부와 지하부를 합한 단위면적당 연간 탄소유입량은 3.2t/ha/yr이었다. 지상부로부터의 유입량 중, 낙지는 10%, 그리고 낙엽 및 기타 부위가 90%를 차지하였다(허성두, 1987; Edwards *et al.*, 1989; 김종성 등, 1996). 토양에 유입된 부위별 연간 분해율은 엽 0.8(체제시간 1.25년), 細根 0.2(체제시간 5년), 기타 목질부 0.05(체제시간 20년) 등인 것으로 보고되었다(Reichle *et al.*, 1973; Ajtay *et al.*, 1979; Edwards *et al.*, 1989; Vogt *et al.*, 1991). 부위별 구성비와 분해율에 근거하여 산정된 토양으로부터의 단위면적당 연간 탄소유출량은 1.9t/ha/yr이었다. 연간 유입량에서 연간 유출량을 제감한 연구대상도시 자연지 토양내 단위면적당 연간 탄소축적량은 약 1.3t/ha/yr인 것으로 추정되었다.

4. 에너지소비 및 탄소배출량

1994년부터 1996년까지 3년 동안, 화석연료소비에

의한 대기로의 탄소배출량은 도시에 따라 평균 15(강릉)-20%(춘천)의 연 증가율을 나타냈다. 연탄의 소비량은 해마다 감소하였으나, 전기, 석유 및 가스의 경우는 해마다 증가하는 추세를 보였다. 그 3년간의 평균 연간 탄소배출량은 춘천시 약 245,590t/yr, 강릉시 281,050t/yr이었다(Figure 2 참조). 「Figure 1과 같이, 이들 총배출량의 87(춘천)-96(강릉)%가 석유 및 전기의 소비에 기인하는 것으로 분석되었다. 인구 1인당 연간 탄소배출량은 춘천시 1.3t/yr, 강릉시 1.8t/yr로서, 미국의 2t/yr보다 적으나, 일본의 1t/yr보다 많았다(Rowntree and Nowak, 1991)」.

1995년도 국내의 총석유소비량 중, 수송용 38%,

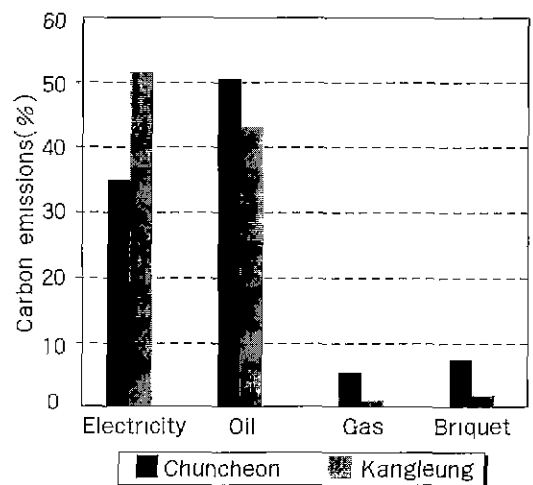


Figure 1. Contribution of each energy types to annual carbon emissions averaged for 3 years from 1994 to 1996

산업용 24%, 주택 및 상업용 22%, 그리고 발전용이 13%를 각각 점유하였다(에너지경제연구원, 1996). 이처럼, 석유는 차량운행에 기인한 소비의 점유율이 가장 높았고, 산업 및 난방도 주소비원이었음을 알 수 있다. 상기한 3년간 전기소비량의 용도별 구성비는, 춘천시에서 주택용 35%, 서비스업용 31% 및 산업용 18%인 반면, 강릉시에서는 산업용 65%, 서비스업용 17% 및 주택용 15%이었다. 공급된 총전기에너지의 61%는 화력, 36%는 원자력, 그리고 나머지 3%는 수력에 의한 것이었다(한국전력공사와의 사진, 1997).

5. 도시녹지의 역할

도시녹지(수목 및 토양)에 의한 총탄소저장량은 춘천시 약 158,820t 및 강릉시 279,190t이었고, 총연간 탄소흡수량은 춘천시 8,430t/yr 및 강릉시 10,350t/yr이었다. Figure 2에서 보듯이, 수목은 총탄소저장량 중 52(춘천)-59%(강릉)를, 총연간 탄소흡수량 중 60(강릉)-67%(춘천)를 각각 점유하였다. 본 연구에서, 낙엽 및 낙지량의 대부분이 수거되고 탄소유동이 인위적으로 교란되는 도심지 토양내 연간 탄소축적량의 산정은 배제되었다. Birdsey(1990)는 미국 삼림생태계의 총

탄소저장량 중, 토양(낙엽 및 낙지 포함) 68%, 수목 31%, 그리고 하층식생이 1%를 차지함을 보고하였다. 「춘천시의 자연지에서는 총탄소저장량(58.2t/ha) 중, 토양이 상대적으로 적은 54%를, 수목이 더 많은 45%를, 그리고 초본식물이 나머지 1%(0.6±0.1t/ha)를 각각 점유하였다」.

도시녹지의 총탄소저장은 춘천시에서 연간 탄소배출량의 66%, 강릉시에서 101%에 상당하는 양이었다. 또한, 도시녹지는 연간 흡수를 통해 양 도시 모두 연간 탄소배출량의 약 4%를 상쇄시키는 것으로 나타났고, 그것은 춘천시에서 약 6,500명, 강릉시에서 5,800명이 각각 배출하는 탄소량을 해마다 흡수하는 셈이었다. 미국 California주 Sacramento시의 경우, 수목에 의한 탄소흡수는 해마다 탄소배출량의 약 2%를 상쇄시켰다(McPherson, 1998). 이 양은 본 연구대상도시들의 경우에 비해 적으나, 토양의 연간 탄소축적량이 배제된 것이다.

본 연구대상도시들의 녹지는 탄소배출량과 비교하여 볼때 현재 적지 않은 탄소량을 저장하고 있고, 대기탄소농도를 저감하는데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 한편, 연간 탄소흡수량으로부터 해석할 수 있듯이 도시녹지가 기후변화를 저지할 유일한 수단일 수는 없다. 대기 CO₂ 농도의 정상화는 근본적으로 화석연료의 효율적 이용과 절약, 저탄소연료나 대체에너지의 개발 등 기술적 대책을 필요로 한다. 그러나, 도시녹지계획을 통한 대기 CO₂ 농도의 저감은 대체에너지의 개발보다 시간과 비용의 절약면에서 더욱 효율적일 것이라고 사료된다. 도시경관에서의 주요한 CO₂ 배출원은 차량 및 산업시설이었으므로, 특히 이들을 대상으로 CO₂ 배출을 최소화하기 위한 기술적, 정책적 방안이 요구된다. 이와 병행하여, 현존 자연지의 훼손억제, 불투수성 면적의 축소 및 식재량의 증대, 연간 생장률이 큰 수종의 식재, 수목의 정상적 생육을 위한 장단기 관리 등을 통해 도시녹지의 CO₂ 흡수 및 저장의 역할을 증진해야 할 것이다.

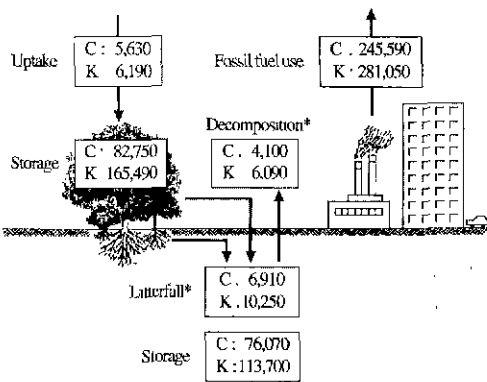


Figure 2. Total storage and total annual flux of carbon (t) in urban landscapes**

Note: * Only natural lands considered
 ** C: Chuncheon. K: Kanglung

IV. 결론

본 연구는 춘천 및 강릉의 강원도 일부 도시들을 대상으로, 도시경관내 녹지에 의한 탄소흡수와 에너지소비에 의한 탄소배출의 양적 관계를 규명하고 도시녹지

의 탄소농도저감 역할을 계량화하였다. 수목에 의한 단위면적당 탄소저장량은 자연지에서 춘천시 26.0t/ha 및 강릉시 46.7t/ha이었고, 도심지에서는 연구대상도시들에 따라 4.7-6.3t/ha이었다. 「수목에 의한 단위면적당 연간 탄소흡수량은 자연지에서 1.60-1.71t/ha/yr이었고, 도심지에서 0.56-0.71t/ha/yr이었다. 자연지 수목의 탄소저장량을 제외하곤, 이들 단위면적당 탄소저장 및 연간 탄소흡수량은 95% 수준의 신뢰구간에서 양 도시간 유의한 차이가 없었다. 춘천시 토양의 단위면적당 탄소저장량은 자연지 31.6t/ha, 도심지 24.8t/ha로서, 자연지가 도심지보다 1.3배 더 많았다. 연구대상도시들의 자연지 토양내 연간 탄소축적량은 약 1.3t/ha/yr인 것으로 추정되었다」.

에너지소비에 의한 인구 1인당 연간 탄소배출량은 춘천시 1.3t/yr, 강릉시 1.8t/yr이었고, 주배출원은 차량 및 산업시설이었다. 도시녹지의 총탄소저장량은 춘천시에서 연간 탄소배출량의 66%, 강릉시에서 101%에 상당하였다. 또한, 도시녹지는 연간 흡수를 통해 연간 탄소배출량의 약 4%를 상쇄시켰다. 기후변화의 원천적인 저지는 화석연료의 효율적 이용과 절약, 저탄소연료나 대체에너지의 개발 등 기술적 대책을 필요로 하지만, 연구대상도시에서 녹지는 대기 CO₂ 농도를 저감하는데 중요한 일익을 담당하였다. 「도시녹지의 CO₂ 흡수 및 저장의 역할을 제고하기 위해서는, 자연지 훼손의 최소화, 불투수성 면적의 축소 및 식재량의 증대, 연간 생산량이 큰 수종의 식재, 수목의 건강한 생육을 위한 적정관리 등의 녹지계획 및 관리전략이 요구된다」.

본 연구에서는 식생의 건물에너지절약에 의한 간접적 탄소흡수와 식생관리(전정, 시비 등)에 기인한 탄소배출을 고려하지 않았다. 간접적 탄소흡수가 합산된다면, 연구대상도시 녹지의 연간 탄소흡수량은 더욱 많을 것으로 기대된다. 본 연구의 한계점은 도심지 수목의 탄소흡수 및 저장을 계량화하는 과정에서 적용가능한 자료가 부재하여, 일부 주요수종들을 제외하곤 자연지 수목의 생체량방정식 및 직경생장률을 활용한 데 있다. 또한, 토양의 탄소유동량 산정은 실측보다는 기존의 연구결과들에 의존하였다. 향후, 도시수목의 생체량 및 직경생장률을 비롯하여 낙엽 및 낙지량과 그들의 분해율에 관한 연구의 축적을 통해, 도시경관에서의 CO₂ 순환에 대한 이해를 심화해야 할 것이다.

인용문헌

1. 강릉시(1997) 강릉통계연보.
2. 권태규(1998) 온실가스 추계 방법론. 에너지경제연구원.
3. 김종성, 손요환, 임주훈, 김진수(1996) 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지의 지상부 생체량, 질소와 인의 분포 및 낙엽에 관한 연구. 한국임학회지 85(3): 416-425.
4. 농촌진흥청(1986) 토양해설도.
5. 농촌진흥청(1988) 토양화학분석법.
6. 박원근(1987) 잣나무와 소나무의 직경생장과 Key-year에 관한 연구 강원대학교 대학원 석사학위논문.
7. 박인협(1985) 백운산지역 천연림생태계의 삼림구조 및 물질생산에 관한 연구 서울대학교 대학원 박사학위논문.
8. 박인협, 이돈구, 이경준, 문광선(1996) 참나무류의 성장 및 물질생산에 관한 연구(1). 한국임학회지 85(1): 76-83.
9. 박인협, 이석면(1990) 한국산 4개 지역형 소나무 천연림의 물질생산에 관한 연구. 한국임학회지 79(2): 196-204.
10. 송철영, 장관순, 박관수, 이승우(1997) 신갈나무와 글참나무 천연림의 탄소고정량 분석. 한국임학회지 86(1): 35-45.
11. 에너지경제연구원(1996) 에너지통계연보.
12. 에너지관리공단(1996) 지역에너지계획 수립 기본지침서.
13. 이경재, 박인협(1987) 경기도 광주지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질생산량과 무기영양물분포. 임산에너지 7(1): 11-21.
14. 이수목(1981) 한국의 삼림토양에 관한 연구(2). 한국임학회지 54: 25-35.
15. 임경빈, 김갑택, 이경재, 김용식, 박인협, 김갑태, 이승호, 박효섭(1981) 15년생 낙엽송임분의 성장 및 생산구조. 임산에너지 1(1): 4-12.
16. 임경빈, 이경재, 권태호, 박인협(1982) 리기다소나무 인공조림지의 물질생산량에 관한 연구. 임산에너지 2(2): 1-12.
17. 정성호, 최문길, 이근수(1983) 중부지방 주요활엽수의 직경 성장에 관한 조사연구. 한국 임학회지 60: 24-29.
18. 조현길, 윤영환, 이기희(1995) 도시녹지에 의한 대기 CO₂의 흡수. 한국조경학회지 23(3): 80-93.
19. 조현길 이기희, 윤영환, 서옥하(1998a) 강원도 일부 도시들의 토지이용 및 녹지구조. 한국조경학회지 25(4): 171-183.
20. 조현길, 조동하(1998) 도시 주요조경수종의 연간 CO₂ 흡수. 한국조경학회지 26(2): 38-53.
21. 조현길, 한갑수 서옥하(1998b) 도시식생의 주택에너지절약 및 탄소배출저감 기능. 한국조경학회지 26(3): 104-117.

22. 최영철, 박인철(1993) 전남 모후산지역 굴참나무천연림과 현사시나무인공림의 물질생산에 관한 연구. 한국임학회지 82(2). 188-194.
23. 춘천시(1997) 춘천통계연보.
24. 허성두(1987) 잣나무림과 물참나무림의 Litter fall과 그 분해에 따른 양분동태에 관한 연구. 강원대학교 대학원 석사학위논문.
25. Ajlay, L. L., P. Ketner, and P. DuVigneaud (1979) Terrestrial production and phytomass. In B. Bolin, 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.
26. Birdsey, R. A. (1990) Carbon budget realities at the stand and forest level. Proceedings of the 1990 Society of American Foresters National Convention. Are Forests the Answers? Bethesda, Maryland: Society of American Foresters. pp. 181-186.
27. Birdsey, R. A. (1992) Methods to estimate forest carbon storage. In R. N. Sampson and D. Hair, eds., Forests and Global Change (Volume 1). Washington, D.C.: An American Forests Publication. pp 255-261.
28. 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.
29. Ciborowski, P. (1989) Sources, sinks, trends, and opportunities. In D. E. Abrahamson, ed., The Challenge of Global Warming. Washington, D.C.: Island Press. pp. 213-230.
30. Connoily, B. J. (1981) Shrub Biomass-Soil Relationships in Minnesota Wetlands. Master Thesis. University of Minnesota.
31. 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.
32. Detwiler, R. and C. Hall (1987) Tropical forests and the global carbon cycle. Science 239 42-47.
33. Dirr, M. A. (1977) Manual of Woody Landscape Plants. Champaign, IL: Stipes Publishing Company.
34. Edwards, N. T., D. W. Johnson, S. B. McLaughlin, and W. F. Harris (1989) Carbon dynamics and productivity. In D. W. Johnson and R. I. van Hook, eds., Analysis of Biogeochemical Cycling Processes in Walker Branch Watershed. New York: Springer-Verlag pp. 197-232.
35. 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
36. 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.
37. Jackson, M. L. (1958) Soil Chemical Analysis New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
38. Jo, H. K. (1993) Landscape Carbon Budgets and Planning Guidelines for Greenspaces in Urban Residential Lands Ph.D. Dissertation. University of Arizona.
39. Jo, H. K. and E. G. McPherson (1995) Carbon storage and flux in urban residential greenspace. Journal of Environmental Management 45: 109-133.
40. Karl, T. R., N. Nicholls, and J. Gregory (1997) The coming climate. Scientific American 5: 78-83.
41. Kemp, D. D. (1990) Global Environmental Issues: a Climatological Approach. New York: Routledge
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. McPherson, E. G. (1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. Journal of Arboriculture 24(4): 215-223.
46. Melillo, J. M., T. V. Callaghan, F. I. Woodward, E. Salati, and S. K. Sinha(1990) Effects on ecosystems In J. T. Houghton, G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums, eds., Climate

- Change Cambridge: Cambridge University Press. pp. 285-310.
47. 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.
48. Nowak, D. J. (1993) Atmospheric carbon reduction by urban trees *Journal of Environmental Management* 37: 207-217.
49. Nowak, D. J. (1994) Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In E. G. McPherson, 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.
50. 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.
51. Olson, J. S. (1970) Carbon cycles and temperate woodlands. In D. E. Reichle, ed., *Analysis of Temperate Ecosystems. Ecological Studies 1.* New York: Springer-Verlag. pp. 227-241.
52. Ovington, J. D. (1956) The composition of tree leaves. *Forestry (British Journal)* 29: 22-29.
53. Phillips, D. R. (1981) Predicted Total-Tree Biomass of Understory Hardwoods. Research Paper SE-223. Asheville, NC: USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.
54. Pingrey, D. W. (1976) Forest products energy overview In *Energy and the Wood Products Industry.* Madison, WI: Forest Products Research Society. pp 1-14
55. 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.
56. Ramanathan, V. (1989) Observed increases in greenhouse gases and predicted climatic changes. In D. E. Abrahamson, ed., *The Challenge of Global Warming.* Washington, D.C.: Island Press. pp. 239-247.
57. 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.* Upton, NY: US Atomic Energy Commission, Office of Information Services. pp. 345-365
58. Remets, W. A. (1973) Terrestrial detritus and the carbon cycle In G. M. Woodwell 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. 307-327.
59. Rodhe, H. (1990) A comparison of the contributions of various gases to the greenhouse effect. *Science* 248: 1217-1219.
60. 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.
61. 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.
62. Schneider, S. H. (1990) The changing climate. In *Managing Planet Earth.* New York: W.H. Freeman and Company. pp. 25-36.
63. 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
64. 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.
65. 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.
66. Telfer, E. S. (1969) Weight-diameter relationships for 22 woody plant species. *Canadian Journal of Botany* 47.

- 1851-1855.
- 67 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.
68. Vogt, K. A., D. I. Vogt, and J. Bloomfield (1991) Input of organic matter to the soil by tree roots. In B. L. McMichael and H. Persson, eds., *Plant Roots and Their Environment*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. pp. 171-190.
- 69 Wenger, K. F. (1984) *Forestry Handbook* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
70. Whittaker, R. H. (1962) Net production relations of shrubs in the Great Smoky Mountains. *Ecology* 43(3): 357-377.
- 71 Whittaker, R. H. and G. M. Woodwell (1968) Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest. *New York. Journal of Ecology* 56(1): 1-25.
72. Whittaker, R. H. and P. L. Marks (1975) Methods of assessing terrestrial productivity. In H. Lieth and R. H. Whittaker, eds., *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag. pp. 55-118