

# 도시녹지의 에너지절약 및 대기 CO<sub>2</sub> 농도저감과 계획지침\*

조현길 · 이기의

강원대학교 건축 · 조경학부

## Energy Saving and Reduction of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration by, and Planning Guideline for Urban Greenspace

Jo, Hyun-Kil · Lee, Ki-Eui

Division of Architecture and Landscape Architecture, Kangwon National University

### ABSTRACT

Carbon dioxide is a major greenhouse gas causing climate change. This study quantified annual direct and indirect uptake of carbon by urban greenspace, and annual carbon release from vegetation maintenance and fossil fuel consumption. The study area was whole Chuncheon and Kangleung, and also two districts of Kangnam and Junglang in Seoul, cities located in middle Korea. Carbon uptake by urban greenspace played an important role through offsetting carbon release by 6-7% annually in Chuncheon and Kangleung. For Kangnam and Junglang, where the population density was relatively higher, urban greenspace annually offset carbon release by 1-2%. Future possible tree plantings could double annual carbon uptake by existing trees in urban lands (except natural and agricultural lands) of a study city. Based on study results, planning and management guidelines for urban greenspace were suggested to save energy and to reduce atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. They included selection of optimum tree species, proper planting location from buildings, design of multilayered plantings, amendment of existing regulations for greenspace enlargement, avoidance of intensive vegetation maintenance, and conservation of natural vegetation.

*Key Words : climate change, uptake, release, net benefit, proper plantings*

\* 본 연구는 1995년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임(과제번호: 95-0402-11-04-3).

## I 서론

세계 각 국가의 경제발전은 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료 소비와 불가분의 관계였으며, 이들 화석연료는 전체 에너지수요량의 약 90%를 점유하고 있다(에너지경제연구원, 1998). 이산화탄소는 요즘 심각한 환경문제인 기후변화를 야기시키는 주요한 온실가스이다(조현길, 1999a). 세계의 최근 CO<sub>2</sub> 농도는 산업화 이전의 경우보다 25-30% 증가하였으며(Post et al., 1990), 국내 CO<sub>2</sub> 배출량은 1990-1996년에 약 9%의 연평균 증가율을 나타냈다(에너지경제연구원, 1997). 대기 CO<sub>2</sub> 농도의 증가는 계속되는 화석연료의 사용과 삼림벌채에 기인한다. 기후변화의 지연은 화석연료의 절약 및 대체에너지의 개발, 삼림훼손의 통제, 그리고 식생복구만을 통해 가능하다. 도시녹지의 확충과 적합한 배식은 대체에너지의 개발보다 CO<sub>2</sub> 농도를 감소시키는데 있어 시간과 비용의 절약면에서 효율적인 뿐만 아니라, 삼림훼손의 영향을 상쇄시키기 위한 대체적 역할의 일부를 담당할 수 있을 것이라고 사료된다.

도시녹지는 세가지 기능 측면에서 대기 CO<sub>2</sub> 농도를 감소시키는데 공헌한다. 첫째는 광합성을 통한 대기 CO<sub>2</sub>의 직접적 흡수이다. 식생은 CO<sub>2</sub> 흡수와 관련된 광합성으로부터 탄수화물의 축적을 통해 성장하며, 이 성장과정은 식생이 죽거나 벌채되기 전까지 계속적으로 대기탄소를 축적한다. 둘째는 건물의 냉난방에너지 절약을 통한 대기로의 CO<sub>2</sub> 배출 저감이다(이하 '간접적 흡수'라고 한다). 주택건물 주변에 적절히 배치된 식생은 차양 및 증발산을 통해 여름철 냉방에너지를 절약하며, 풍속감소(이하 '방풍'이라 한다)를 통해 겨울철 난방에너지의 요구를 감소시킨다. 냉난방에 필요한 화석연료의 절약은 결국 그에 함유된 탄소의 대기 배출을 저감하게 된다. 셋째는 토양의 탄소축적 기능이다. 식물의 광합성으로부터 축적된 생체량의 일부는 해마다 성장기만인 토양에 이입되며, 미생물에 의한 분해량을 제외한 유기탄소는 토양에 축적된다.

한편, 도시식생은 관리행위, 즉 잔디깎기, 전정, 관수, 시비, 농약사용 등의 과정에서 직접, 간접적으로 대기에 CO<sub>2</sub>를 방출한다. 직접적인 방출의 예는 잔디깎는 기계의 가동에 사용되는 화석연료로부터의 CO<sub>2</sub> 방출이다. 간접적인 방출은 제조과정에서 화석연료의 소

비를 요구하는 비료나 농약이 식생관리를 위해 사용될 때 발생한다.

국외연구들(Beatty, 1989; Rowntree, 1989; McPherson, 1998)은 도시녹지는 기후변화를 지연할 잠재력이 있으며, 에너지를 절약하고 CO<sub>2</sub> 농도를 감소시킬 적절한 녹지계획 및 관리전략이 필요하다고 주장하였다. Minnesota Department of Natural Resources(1991)는 미네소타에서 인간활동으로 배출된 탄소량과 녹지에 의해 흡수된 탄소량을 산정 비교하고, 탄소흡수와 에너지보전을 극대화하기 위한 식재 프로그램을 마련하였다. Jo(1993)는 시카고시 주거경관내 탄소순환을 계량화하고 대기탄소농도를 저감하기 위한 녹지계획 및 관리지침을 제시한 바 있다. 그러나, 이들 국외연구들은 도시녹지에 의한 직간접적 CO<sub>2</sub> 흡수 및 방출을 이해하고, 그 흡수를 최대화하기 위한 적절한 녹지계획기법을 개발하는데 있어 아직 초보단계에 머물고 있다. 국내의 경우, 에너지절약 및 CO<sub>2</sub> 농도저감을 위한 도시녹지계획과 관련된 연구는 더욱 미흡한 실정이다. 에너지자원이 부족한 국내는 전체 에너지소비량의 약 98%를 수입에 의존하며, 가정부문의 에너지소비는 전체의 약 20%를 차지하고 있다(에너지경제연구원, 1997). 가정의 냉난방에너지 절약을 위한 도시녹지계획 관련 연구는 에너지수입 의존도를 줄이는데 일조할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 한국 중부지역의 일부 도시들을 대상으로 도시녹지에 의한 연간 직간접적 탄소흡수와 방출을 계량화하고, 에너지절약과 탄소농도저감을 위한 적절한 녹지계획 및 관리지침을 제시하는 것이다. 본 연구에서, 도시녹지란 농경지를 제외한 도시의 교목, 관목 및 초본식물 자체를 포함하여 그들의 식재나 생장이 가능한 토양면을 지칭하며, 녹지계획이란 녹지의 공간적 배치 또는 네트워크를 일컫는 녹지체계의 계획과는 구별되는 개념이다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 연구대상도시 선정

본 연구는 중부권 도시들 중, 인구밀도가 낮으면서 기후조건이 상이한 춘천 및 강릉시(강릉시, 1997: 춘

천시, 1997)와 인구밀도가 상대적으로 높은 서울시(서울시, 1997)를 연구대상도시로 선정하였다. 연구대상의 춘천 및 강릉시는 시군통합 이전의 행정구역 전체를 일컫는다. 방대한 면적을 지닌 서울시의 경우, 시 전체의 토지이용 구성비와 유사한 특성을 지닌 행정구들 중, 소득수준이 중상위이고 신주택들을 대표하는 강남구와 소득수준이 하위이고 구주택들을 대표하는 중랑구(조현길 등, 1998a)를 선택하였다. 소득수준 및 건축연도의 차이는 식생구조와 관리상의 차이를 야기시켜 탄소흡수 및 방출에 영향을 미칠 것으로 가정하였다.

## 2. 녹지의 탄소흡수 및 방출량 산정

강남 및 중랑구의 식생에 의한 연간 직접적 탄소흡수는 도심지<sup>14</sup> 낙엽활엽교목종의 경우 적외선개사분석기에 의한 측정결과(조현길과 조동하, 1998)를, 도심지의 기타 수종과 자연지 수목의 경우 수종별 연간 직경성장률과 생체량방정식(조현길, 1999a)을 이용하여 계량화되었다. 이에 필요한 토지이용유형별 식생 및 면적자료는 현지실측과 항공사진분석을 통해 수집한 조현길 등(1998a)의 연구결과를 활용하였다. 춘천 및 강릉시의 식생에 의한 연간 직접적 탄소흡수량 파악은 조현길(1999a)의 관련연구에 근거하였다. 연구대상도시 내 잔디에 의한 연간 직접적 탄소흡수량은 단위잔디면적( $m^2$ )당 뿌리의 흡수량인  $47.1g$ (Jo and McPherson, 1995)을 토지이용별 총잔디면적(조현길, 1999b)에 곱하여 추정하였다. 식생의 연간 간접적 탄소흡수는 대상도시별 주택건물 유형 및 주택주변 수목피도(조현길 등, 1998a: 1998b)를 파악하고, MICROPAS(ENERCOMP, Inc., 1995) 및 SPS(McPherson *et al.*, 1985)의 두 컴퓨터시뮬레이션 프로그램을 활용한 주택에너지 절약의 연구결과(조현길 등, 1998c)를 적용하여 계량화되었다. 자연지 토양의 연간 탄소유동량은 수목의 낙엽, 낙지 및 낙근에 의한 단위면적당 탄소유입량과, 그들의 분해를 통한 대기로의 단위면적당 탄소유출량(조현길, 1999a)을 대상도시별 자연지 총면적(조현길 등, 1998a: 1998b)에 곱하여 산출하였다. 도심지 식생의 관리에 기인한 연간 직간접적 탄소방출량은 전정, 잔디깎기,

관수, 시비, 농약사용 등에 대한 대상도시별 관리실태 조사와, 이를 바탕으로 구한 토지이용별 수목피도 및 잔디의 단위면적당 탄소방출량(조현길, 1999b)을 적용하여 산정하였다.

## 3. 에너지소비 조사 및 탄소배출량 산정

서울시에서 연간 소비하는 전기, 석유, 가스, 연탄 등의 화석에너지 총량을, 통계자료(서울시, 1997)의 수집을 비롯하여 한국전력공사 및 시청을 방문하여 파악하였다. 에너지소비 종류별 탄소배출계수(조현길, 1999a)를 이용하여 서울시 인구 1인당 탄소배출을 계량화하고, 강남 및 중랑구의 총인구에 의한 연간 탄소배출량을 산정하였다. 춘천 및 강릉시의 탄소배출량은 기존 연구(조현길, 1999a)를 참조하여 파악되었다.

## 4. 적정 식재위치의 파악

주택건물 주변 차양수목의 크기별, 식재방위 및 거리별 냉난방에너지 절약량(조현길, 1998c)을 탄소량으로 전환하고, 차양수목유형별 연간 간접적 탄소흡수량을 비교하여 건물 주변 가장 효과적인 식재위치를 파악하였다. 난방에너지 절약량은 1MJ당 단독주택 0.0162kg 및 다세대주택 0.0178kg의 탄소량으로, 냉방에너지 절약량은 1kWh당 0.2247kg의 탄소량으로(조현길, 1998c) 각각 전환되었다.

## 5. 식재잠재력 조사

도심지 식재잠재력을 조사하여 장래 식재를 통해 증진가능한 수목의 피도와 탄소흡수 잠재력을 파악하였다. 즉, 현존 수목의 수관에 의해 점유되지 않은 공간층, 지상부의 가공선, 건물벽과 옹벽 및 지하부의 매설물(정화조, 맨홀 등)에 의한 방해없이, 투수성 표면에 식재가능한 수목의 수관면적 및 개체수를 조사하였다. 식재가능한 수목은 크기에 있어 수관폭 2m, 수고 3m 이상의 것만을 포함하였다. 주거지 및 공공용지의 식재잠재력은 축척 1/10,000의 지형도상에서 체계적 임의표본추출(systematic random sampling)에 의해 표본추출지점들을 선정하여 실측되었다. 단독주거

지의 경우, 지도상에 2cm 간격의 격자를 그려 춘천시 66개, 강릉시 62개, 강남구 65개 및 중랑구 64개의 격자점을 임의로 선택하고, 이들 격자점에 가장 근접한 주택의 대지를 조사하였다. 다세대주거지와 공공용지의 경우, 지도상에 8cm 간격의 격자를 그려 각 격자점에 가장 인접한 주택단지와 공공기관을 표본추출하고 해당 부지를 조사하였다. 다세대주택단지는 춘천시와 중랑구 각각 10개, 강릉시 13개, 강남구 17개 등, 총 50개가 표본추출되었다. 공공기관은 학교, 시청 또는 구청 등을 포함하여, 춘천 및 강릉시 각각 6개, 강남 및 중랑구 각각 5개 등, 총 22개가 선정되었다. 행정지의 식재잠재력은 연구대상도시 및 구별로 각각 3개의 어린이 또는 근린공원을 임의로 선정하여 실측되었다. 상공업지, 교통용지 및 기타 토지이용의 식재잠재력은 항공사진상에서의 토지피복유형 판독결과(조현길 등, 1998a; 1998b)를 바탕으로, 수목수관으로 피복되지 않은 초본 및 나지의 구성비를 산정하여 파악되었다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 도시경관내 탄소유동과 녹지의 효과

연구대상도시별 녹지의 연간 총탄소흡수 및 방출량과 순탄소흡수의 효과를 요약하면 Table 1과 같다. 도심지 및 자연지 수목의 연간 총탄소흡수량은 춘천시 약 7,230톤, 강릉시 8,630톤, 강남구 12,300톤 및 중랑구 5,900톤이었다. 수목관리에 의한 연간 총탄소방출량은 춘천시 약 120톤, 강릉시 130톤, 강남구 330톤 및 중랑구 140톤으로서, 관리되지 않는 자연지 수목을 제외한 도심지 수목의 직접적 탄소흡수량의 13(중랑구)-21%(강남구)에 해당하였다.

수목의 총탄소흡수량 중, 도심지 수목만의 흡수량은 춘천 및 강릉시에서 30-38%를, 강남 및 중랑구에서 63-68%를 차지하였다. 도심지 수목의 흡수량 중, 간접적 흡수량은 도시에 따라 73(춘천시 및 중랑구)-81%(강남구)를 점유하였다. 즉, 주택에너지 절약을 통한 도심지 수목의 간접적 탄소흡수량은 광합성을 통해 직접적으로 흡수하는 양보다 도시에 따라 3-4배 더 많았다. 따라서, 도심지의 수목 한 그루는 자연지의 경

우보다 대기탄소농도의 감소효과가 더욱 클 수 있다. 그러나, 자연지는 도심지보다 수목밀도가 높아 단위면적당 직접적 탄소흡수량이 더 많다(자연지: 1.6-3.9t/ha/yr, 도심지: 0.5-0.8t/ha/yr). 탄소농도의 저감차원에서, 도심지에서의 적극적인 수목식재와 더불어 도시 인근 자연식생지의 훼손을 최소화하기 위한 전략이 필요하다.

Table 1 Annual carbon budget for greenspace components and net benefit of greenspace offsetting annual carbon release in study cities

City	Component	Uplake(t)	Release(t)	Offset(%)
Chuncheon	Tree & shrub	7,226	118	
	Grass	13	15	
	Soil	6,910	4,100	
	Fossil fuel	-	245,592	
	Total	14,149	249,825	
Kangleung	Tree & shrub	8,631	127	
	Grass	26	26	
	Soil	10,250	6,090	
	Fossil fuel	-	281,049	
	Total	18,907	287,292	
Seoul-Kangnam	Tree & shrub	12,303	330	
	Grass	76	65	
	Soil	2,140	1,270	
	Fossil fuel	-	850,769	
	Total	14,519	852,431	
Seoul-Jungang	Tree & shrub	5,896	136	
	Grass	11	9	
	Soil	1,680	1,000	
	Fossil fuel	-	702,926	
	Total	7,587	704,071	

잔디의 경우, 총흡수량에서 관리에 기인한 총방출량을 제감한 연간 순탄소흡수량은 춘천시 -2톤, 강릉시 0톤, 강남구 11톤 및 중랑구 2톤이었다. 이와 같이, 잔디는 춘천시에서 흡수량보다 방출량이 더 많았고, 타 연구도시 및 구에서도 방출량은 흡수량의 82(중랑구)-100%(강릉시)이었다. 미국 시카고시 주거지에서 잔디의 관리에 의한 연간 탄소방출량이 그 흡수량의 1.6배에 달하였다(Jo and McPherson, 1995). 이러한 결과는 잔디식재에 상당한 면적을 할애하는 녹지계획은 에너지절약 및 탄소농도저감상 바람직하지 않음을 시사한다.

자연지 토양의 연간 순탄소축적량<sup>2)</sup>은 연간 총탄소유입량의 약 41%로서, 춘천시 2,810톤, 강릉시 4,160톤, 강남구 870톤 및 중랑구 680톤이었다. 본 연구에서,

낙엽 및 낙지량의 대부분이 수거되고 탄소유동이 인위적으로 교란되는 도심지 토양내 연간 순탄소축적량의 산정은 배제되었다. 대기탄소농도 증가의 주 원인이 되는 화석에너지 소비와 그리고 식생관리 및 토양분해로부터의 연간 총탄소방출량은 춘천시 약 249,830톤, 강릉시 287,290톤, 강남구 852,430톤 및 중랑구 704,070톤이었다.

식생 및 토양을 포함한 도시녹지에 의한 연간 총탄소흡수량은 춘천시 14,150톤, 강릉시 18,910톤, 강남구 14,520톤 및 중랑구 7,590톤이었다. 도시녹지는 흡수 및 축적을 통해 춘천 및 강릉시에서 해마다 총탄소방출량의 6-7%를, 강남 및 중랑구에서는 1-2%를 상쇄시키는 효과를 나타냈다. 강남구와 중랑구간 토지이용별 단위면적당 수목의 탄소흡수와 식생관리에 따른 탄소방출은 95% 수준의 신뢰구간에서 유의한 차이가 없었다. 강남구와 중랑구의 토지이용 및 토지피복구성비, 토지이용별 단위면적당 탄소흡수 등의 연구결과에 기초하여 산출한 서울시 전체 녹지의 연간 총탄소흡수량은 241,280톤이었다. 이 흡수량은 연간 총탄소방출량(16,078,850톤)의 약 2%에 해당하였다. 미국 새크라멘토시의 수목은 서울시의 경우와 유사하게 해마다 총탄소방출량의 2%를 흡수하는 것으로 보고되었다(McPherson, 1998). 선진국들의 1997년 기후변화협약은 1990년 온실가스 배출대비 평균 5%를 2010년까지 삭감하기로 타결했는데(에너지경제연구원, 1997), 그 협약에 따른 국내 CO<sub>2</sub> 배출저감 압력과 비용을 예상하면 상기한 도시녹지의 연간 탄소흡수 효과는 중요한 의의를 지닌다고 판단된다.

도시녹지의 탄소방출 상쇄효과가 서울시에서 춘천 및 강릉시보다 적은 것은 인구밀도가 높아 화석에너지 소비량이 많은 반면, 상대적으로 녹지량이 적기 때문이라고 사료된다. 도시녹지의 연간 총탄소흡수량 중, 춘천 및 강릉시에서 수목이 46-51%, 토양이 49-54%를, 그리고 강남 및 중랑구에서 수목이 78-85%, 토양이 15-22%를 각각 점유하였다. 강남 및 중랑구에서는 총면적 중 자연지의 점유율이 상대적으로 적어 토양의 역할이 춘천 및 강릉시보다 적었다.

## 2. 적정 식재위치

차양수목의 냉난방에너지 절약을 통한 탄소배출 저감량, 즉 간접적 탄소흡수량은 주택건물 주변 동북, 동, 동남, 남, 서남, 서, 서북 등 7개 방위 중, 서향의 식재에서 가장 많은 것으로 나타났다. Table 2에서와 같이, 서향의 차양수목들 중에서도 벽면 가까이에 식재된 중형 또는 대형수목의 차양효과가 가장 컸다. 단독주택의 서향으로 5m의 거리에 식재된 대형수목(수관폭 7m x 수고 10m) 한 그루는 여름철 오후의 광선을 차단하여 해마다 단위바닥면적당 약 53g/m<sup>2</sup>의 탄소배출을 저감하였다. 다세대주택의 경우, 서향으로 3m의 거리에 식재된 중형수목(수관폭 5m x 수고 7m)의 연간 간접적 탄소흡수량은 2g/m<sup>2</sup>이었다.

Table 2 Shading effect of different sizes and locations of trees around building on annual indirect uptake of carbon per unit conditioned floor area from heating and cooling energy savings for building types<sup>a</sup>

Direction	Size <sup>b</sup>	Distance (m)	Delached (g/m <sup>2</sup> /tree)	Multifamily (g/m <sup>2</sup> /tree)
East	Small	3	-33.4	-16.9
	Medium	3	6.5	0.1
	Medium	5	0	0
	Large	5	40.0	1.0
	Large	7	0	0
South	Small	3	-37.0	-7.8
	Medium	3	-92.1	-12.2
	Medium	5	-64.1	-10.1
	Large	5	-105.4	-16.2
	Large	7	-64.1	-13.4
West	Small	3	5.5	0
	Medium	3	23.4	2.2
	Medium	5	18.0	1.1
	Large	5	53.3	0.9
	Large	7	33.5	0.8

<sup>a</sup> Negative values indicate increase of heating energy use due to winter shade.

<sup>b</sup> Tree size (crown width x height in m) is 3 x 4 for small, 5 x 7 for medium, and 7 x 10 for large.

건물의 동향 가까이에 위치한 대형수목은 서향 수목 못지 않은 양호한 차양효과를 보였다. 그러나, 동향의 나머지 차양유형은 간접적 흡수가 미미하였고, 소형수목은 오히려 탄소배출을 증가시키는 역효과를 나타냈다. 그러한 역효과는 동남향, 남향 및 서남향에 위치한 모든 유형의 차양수목에서 현저하였다. 특히, 남향 및 동남향의 대형수목은 단독주택에서 해마다 최대 105g/m<sup>2</sup>, 다세대주택에서 36g/m<sup>2</sup>의 탄소배출을 가증시켰다. 그 이유는 태양고도가 낮은 겨울철에 건물의

일조를 방해하고 태양고도가 높은 여름철에는 광선차단의 효과가 적어, 여름철 냉방에너지의 절약에 비해 겨울철 난방에너지를 더욱 요구하기 때문이다.

동북 및 서북향 수목의 차양에 의한 연간 간접적 탄소흡수는 단독주택에서 최대 2.9g/m<sup>2</sup>였으나, 다세대주택에서는 극히 미미하였다. 다세대주택에서 간접적 탄소흡수가 전반적으로 단독주택에 비해 적은 이유는, 수목 한 그루당 차양되는 다세대주택의 벽 및 바닥면적이 단독주택보다 훨씬 크기(조현길 등, 1998c) 때문인 것으로 사료된다.

결국, 수목차양의 역효과를 최소화하고 간접적 탄소흡수를 증진하기 위한 적절한 식재위치는 건물의 서향 및 동향의 벽면 가까운 곳으로, 가급적 대형수목을 식재하는 것이 바람직하다. 온대지방을 대상으로 수행한 기존의 국외연구들(Minnesota Department of Natural Resources, 1991; McPherson *et al.*, 1993; Jo and McPherson, 2000)도 차양에 의한 에너지절약 효과가 가장 양호한 식재방위는 건물의 서향 및 동향이며, 남향에 식재된 차양수목은 오히려 난방에너지이용을 증가시킴을 보고하였다.

### 3. 식재잠재력

도심지에서 장래 식재를 통해 증진가능한 수목피도는 Table 3과 같이 춘천 및 강릉시가 전체면적의 약 2%이었고, 강남 및 중랑구가 7-8%로서 춘천 및 강릉시보다 높았다. 피도면적상의 식재잠재력은 춘천시 95.4ha, 강릉시 144.4ha, 강남구 328.7ha 및 중랑구 127.7ha이었다. 토지이용별 수목의 식재잠재력은 대체로 행락지 및 공지에서 현저히 높았고, 강릉시 및 강남구의 경우 단독주거지에서도 상당하였다. 낮은 식재잠재력을 보인 토지이용은 중랑구를 제외하곤 교통용지이었다. 현존 수목의 단위피도면적당 탄소흡수량을 적용하면, 수목식재를 통해 증진가능한 연간 직간접적 탄소흡수량은 춘천시 약 1,590톤, 강릉시 3,170톤, 강남구 6,610톤 및 중랑구 2,500톤이었다. 이와 같은 탄소흡수 잠재력은 도시에 따라 도심지 수목에 의한 현존 흡수량의 70(춘천시 및 중랑구)-100%(강릉시)에 달하였다.

Table 3. Tree planting potential in areal cover(%) for each land use in study cities

Land use	Chuncheon	Kang-leung	Seoul	
			Kangnam	Jung'ang
Residential Detached	9.9	15.2	16.1	8.6
Multifamily	7.8	7.2	13.3	9.8
Commercial & industrial	5.8	2.0	14.6	12.2
Institutional	7.9	18.3	4.0	4.4
Recreational	37.3	23.0	13.3	35.3
Transportation	1.5	1.5	4.8	11.1
Other(vacant)	61.9	-	68.4	82.6
Total*	1.8	1.9	8.3	6.9

\* It indicates estimates for total area.

### 4. 도시녹지계획 및 관리 지침

식재잠재력 분석이 시사하듯이, 연구대상도시들에서는 적지 않은 면적에 걸쳐 수목의 추가식재가 가능한 것으로 나타났다. 그런데, 무분별한 수목식재와 관리는 도시녹지의 CO<sub>2</sub> 농도저감 효과를 극대화하는 차원에서 비효율적일 수 있다. 그 효과를 더욱 증진하기 위한 도시녹지의 확충방안을 포함한 적정 계획 및 관리지침을 본 연구와 기존 연구의 결과들에 근거하여 제시하면 다음과 같다.

#### 1) 적정수종 선정

활엽수는 침엽수보다 연간 생장률이 커서(조현길, 1999a) 해마다 대기 CO<sub>2</sub>를 흡수 저장하는 양이 더 많았다. 따라서, CO<sub>2</sub> 농도를 저감하기 위해서는 침엽수보다 활엽수의 식재가 더 적합하다. 활엽수종들 중에서도 CO<sub>2</sub> 흡수능이 높은 수종을 선정 식재하는 것이 바람직하다. 그러한 수종은 도시의 불량한 환경조건하에서도 연간 생장이 양호한 것으로서, 대표적인 예는 은행나무, 느티나무 등이다(조현길과 조동하, 1998). 연간 생장량이 적은 관목은 교목하부식재, 경계식재, 협소한 공간내의 식재 등 특별한 경우를 제외하곤, 가능하다면 교목으로 대체 식재할 것을 제안한다. 아울러, 수목의 정상적인 생육 및 활력을 확보하고 관리요구를 최소화하여 연간 CO<sub>2</sub> 흡수를 증진하기 위해, 식재공간의 토양 및 미기후 조건에 부합하는 수종(예를 들면, 건물복측엔 내음성 수종의 식재)을 선정해야 한다.

#### 2) 적정 식재계획

(1) 건물주변 식재기법

수목차양에 의한 건물의 냉난방에너지 절약 및 간접적 탄소흡수의 효과가 가장 큰 식재방위는 건물의 서향 및 동향이었다. 건물의 서향으로 가급적 창 및 벽면 가까이 수목을 밀식하여 여름철 오후의 광선을 최대한 차단해야 한다. 또한, 건물의 동향 가까이에 대형 낙엽 활엽교목을 식재하여 여름철 오전의 광선은 차단하고 겨울철 오전의 일사는 허락하는 전략이 필요하다. 동향에의 소교목 및 상록수 식재는 겨울철 오전의 일조를 방해하므로 바람직하지 않다.

건물의 동남향, 남향 및 서남향의 차양수목은 겨울철 광선을 차단하여, 난방기간이 긴 중부지방에선 난방에너지 요구를 가중시켰으므로 식재를 회피해야 한다. 이들 방향에 식재가 불가피하다면, 태양고도가 높은 여름철엔 지붕에의 일사를 차단할 수 있고(저층 건물에 해당), 태양고도가 낮은 겨울철엔 창 및 벽면에의 광선투과를 최대화할 수고(가 큰 태양친화적 교목(solar-friendly tree)을 식재해야 한다. 여기에서, 태양친화적 수목이란 봄의 개엽시기가 늦은 반면 가을의 낙엽시기가 이르고, 낙엽된 후 가지밀도가 낮아 난방기간 중 광선투과가 양호한 낙엽수를 의미한다. 이러한 수목의 예는 층층나무, 은행나무, 회화나무, 팽나무 등이다.

여름철 시원한 서남풍의 건물내 유입을 방해하는 식재는 옳지 않다.

건물의 동북향, 북향 및 서북향에는 수목을 가능한 밀식하여 광합성에 의한 대기 CO<sub>2</sub>의 직접적 흡수와 증발산 및 방풍효과에 의한 간접적 흡수를 최대화해야 한다. 서북향에는 상록수를 식재하여 겨울철 찬 서북풍을 감속시켜 난방에너지를 절약해야겠다. 북향 건물벽에 인접하여 상록관목을 식재하면 건물내부로의 찬 바람의 침투와 외부로의 열손실을 최소화할 수 있다( Miller, 1997).

(2) 식생구조의 개선

도시내 식재상의 현존 특징은 잔디의 지피식재, 교목 혹은 관목의 열식, 또는 잔디면위 교목의 단식 등과 같은 단층구조에 의해 대표된다. 단위면적당 식물생체량 및 CO<sub>2</sub> 흡수량을 증진하기 위해, 잔디공간은 꼭 필요한 용도 이외엔 축소하고 자연식생지에서 볼 수 있는 다 지피식물, 관목 및 교목으로 구성되는 다층구조의 식생경관을 조성해야 할 것이다(Figure 1 참조). 이러한 수직적 다양성의 창출은 대기오염완화, 물의 재순환, 생물다양성의 유지 등 녹지의 기타 환경생태적 기능도 함께 증가시킬 수 있다( Miller, 1997).

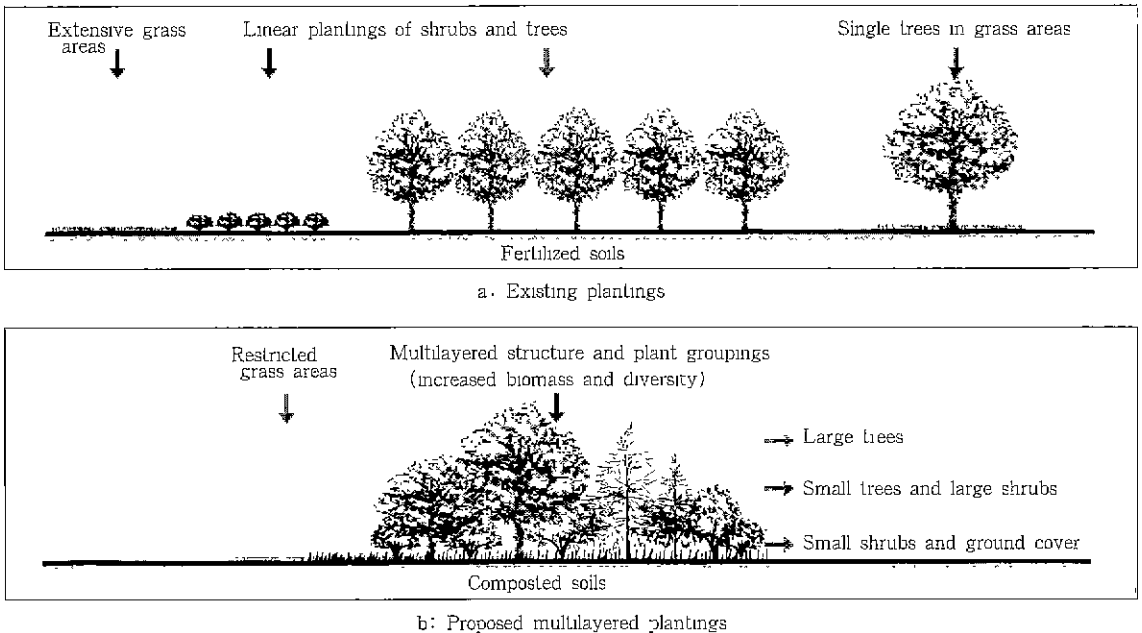


Figure 1 Examples of existing plantings and proposed multilayered plantings for increasing atmospheric CO<sub>2</sub> uptake

### 3) 녹지확충 방안 및 관련법규 개정

#### (1) 유휴공간 및 구조물 녹화

녹지의 대기 CO<sub>2</sub> 흡수 및 저장량은 수목피도 및 토양면적과 비례한다. 인공구조물 및 불투수성 면적이 우점하는 도심내에서 녹지면적을 증대하기 위해서는, 주차장, 유휴도로공간(교통섬, 중앙분리공간 등), 어린이 및 근린공원의 비시설용지, 하천제방, 잔여공지 등에서의 적극적인 수목식재가 필요하다. 옥상과 벽면의 녹화, 담장의 생물타리 대치 등도 도심내 생태량을 증진하는 효과적인 방안이다. 주차장 및 도로의 포장, 벽면 등의 차양식재는 인공구조물의 복사열 흡수를 저지하고 반사열을 차단하여(조현길과 안태원, 1999), 열섬현상 완화 및 건물에너지 절약에 의한 간접적 탄소흡수에 기여할 수 있다. 주차장의 지하화, 가공선의 지하매설 등은 도심내 부족한 식재공간의 확보를 위해 추진되어야 한다.

#### (2) 정원 관련법규 강화

단독주거지는 도심지에서 상당한 토지이용비를 점유하므로(조현길 등, 1998a; 1998b), 녹지면적의 증대와 관련하여 주목될 수 있는 주요 토지이용유형이다. 건축법시행령 제27조에 의하면, 대지내 조경면적은 건축물의 연면적에 따라 최소 5-15%이며, 그 대상을 면적 200m<sup>2</sup> 이상의 대지에 한정하고 있다(권오준 등, 1996). 그러나, 대지규모 200m<sup>2</sup> 이하인 단독주택수가 연구대상도시들에 따라 전체의 40-50%로서 적지 않고(조현길 등, 1998a; 1998b), 최소 5%의 조경면적도 매우 적은 규모이므로 이들 조항에 대한 개정을 통해 녹지면적의 확보를 도모해야 한다.

#### (3) 공원 관련법규 개정

연구대상도시들에서 일상권 공원<sup>3)</sup>의 토지이용구성비는 총면적의 1-4%로서(조현길 등, 1998a; 1998b) 상당히 낮은 것으로 분석되었다. 수도권 도시들의 총면적 중, 일상권 공원의 면적비는 0.3%이었고 인구 1인당 공원면적은 0.7m<sup>2</sup>로서, 도시공원법상의 시가화구역 기준(3m<sup>2</sup>/인)보다 훨씬 적었다(한국토지개발공사, 1993). 도시공원법 시행규칙 제4조에 의하면, 도시공원 중 규모가 가장 적은 어린이공원의 설치규격은 1,500m<sup>2</sup> 이상이어야 한다(권오준 등, 1996). 집약적 토지이용이 특징적인 도심내에 이 정도의 용지를 확보하기란 쉽지 않다. 공원수 및 녹지면적의 증가차원에서

도시공원법내에 더욱 적은 규모의 소공원 설치를 추가 규정할 필요가 있다. 현행 도시공원법상 공원의 유형별 갯수는 유치거리에 의해 결정되어 왔으나, 인구밀도를 기준으로 공원수를 책정하고 녹지를 확충하는 개선안이 마련되어야 한다.

#### 4) 관리지침

각종 식생관리행위 중, 수목전정과 잔디깎기가 대기에 CO<sub>2</sub>를 방출하는 주요 요인이었다(조현길, 1999b). 도심지 식생의 연간 순탄소흡수를 최대화하기 위해, 그들 행위에 기인한 탄소방출을 최소화해야 한다. 특히, 가로수의 경우 가공선의 보호차원에서 해마다 상당한 생장량이 전정되는 것으로 나타났다(조현길 등, 1998b). 지나친 전정은 도심내 부족한 생태량을 더욱 감소시키고, 또한 수목의 활력 및 기능을 저하시킬 수 있다. 따라서, 전선의 지하매설을 통해 가로수의 정상적인 생장공간을 확보하거나, 전정에의 전문가 참여, 대교목보다는 증소형 가로수종의 선정 등 과도한 전정을 피하기 위한 전략이 요구된다.

공원잔디는 관리과정에서 토지이용들 중 단위잔디면적당 가장 많은 탄소량을 대기에 방출하였다(조현길, 1999b). 반드시 필요한 용도이외의 광범위한 잔디공간을 축소하고 대신 다층구조의 생태식재 및 관리의 배제를 통해, 공원잔디의 관리에 기인한 에너지소비와 CO<sub>2</sub> 배출을 저감해야 할 것이다. 전정된 가지는 토양내의 탄소축적을 도모하기 위해 소각보다는 토양 유기물 또는 피복재료로 활용할 수 있다.

수목직경은 연구대상도시 모두 유목 및 성장과정의 수목들이 우점하는(흉고직경 20cm 이하의 교목이 90-95% 차지) 단령구조를 보였다(조현길 등, 1998a; 1998b). 성목은 유목보다 CO<sub>2</sub> 축적량이 많으므로, 지형변경시 기존 성목의 벌목지양 혹은 이식, 성장과정에서의 지속적 관리 등을 통해 다령구조로 전환될 필요가 있다.

자연지는 도심지보다 단위면적당 수목의 직접적 탄소흡수량과 토양의 탄소축적량이 더욱 많다. 그러나, 도시팽창 및 각종 개발행위는 도시인근 자연식생지의 면적을 축소하고 식생 및 토양에 의해 흡수 저장된 탄소를 방출시켜 왔다. 대기 CO<sub>2</sub> 농도의 저감차원에서, 자연식생지의 훼손을 최소화하기 위한 관리전략을 마



려해야 한다. 개발이 불가피하다면, 기존 수목을 적극적으로 이식하고 표토를 식재에 재활용할 것을 제안한다.

#### 5) 공공참여 및 녹지공급량 설정

도심지의 녹지확충과 불투수성 면적의 축소를 포함한 상기의 녹지계획 및 관리의 실행은 정책입안자 및 공무원, 건축가, 도시계획가, 시민 등 공공의 참여없이는 불가하다. 조경가를 비롯한 관련 전문가는 도시녹지의 혜택 및 중요성을 홍보하여 수목식재에 대중의 적극적, 자발적 참여를 유도해야 할 것이다. 민간중심의 도시녹화기금 조성, 녹화자원봉사대의 구성, 1가구 1그루 식재 및 보호 등 도시녹지계획과 관련된 범시민적 프로그램의 마련 및 운동의 전개가 요구된다. 화석연료 소비와 그로 인한 CO<sub>2</sub> 배출은 인구밀도에 비례하므로, 그 배출의 일부를 상쇄할 인구 1인당 녹지공급 목표를 도시별로 설정하는 것이 바람직하다.

## IV. 결 론

본 연구는 도시녹지에 의한 연간 직간접적 탄소흡수와 방출을 계량화하고, 에너지절약과 탄소농도저감을 위한 녹지계획 및 관리지침을 제시하였다. 연구대상지는 춘천 및 강릉시의 행정구역 전체와 서울시의 강남 및 중랑구이었다. 도시녹지의 탄소흡수는 춘천과 강릉시에서 식생관리, 토양분해 및 에너지소비로부터의 총 탄소방출량을 해마다 6-7% 상쇄시키는 중요한 역할을 담당하였다. 인구밀도가 높아 에너지소비량이 많고 상대적으로 녹지량이 적은 강남 및 중랑구에서, 도시녹지는 총탄소방출량의 1-2%를 상쇄시켰다.

현실적으로 식재가능한 공간내 장애의 적극적인 수목식재는 일부 연구대상도시에서 도심지 수목의 현존 연간 탄소흡수량을 배가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 도시녹지의 적정한 계획과 관리는 무분별한 적극적 수목식재보다 대기 CO<sub>2</sub>를 더욱 많이 저감하는데 기여할 것이다. 연구결과를 토대로, 도시녹지의 연간 순탄소흡수를 극대화하기 위한 계획 및 관리 지침을 제시하였다. 그 지침은 적정수종의 선정, 건물주변 방위별 적정식재기법, 다층 식생구조의 조성, 녹지확충을 위한 정원 및 공원 관련법규의 개정, 식생관리장도의

최소화, 자연식생지 보전 등을 포함하였다.

잔디의 직접적 탄소흡수량 산정은 국내의 관련 자료가 전무하여 국외의 연구결과를 이용하였으나, 잔디의 연간 생장과 탄소흡수는 기후, 토양, 관리 등의 환경조건에 따라 상이할 수 있다. 강릉시를 비롯한 강남 및 중랑구의 수목에 의한 간접적 탄소흡수는 춘천시를 대상으로 연구한 결과에 기초하여 계량화되었다. 그러나, 수목의 냉난방에너지 절약은 도시간 냉난방기간이 유사하더라도, 주택건물 구조, 건물주변 차양수목유형 등의 특성에 따라 차이가 나타날 수 있다. 향후 실측에 의한 보강연구를 통해 비교 검토될 필요가 있다. 또한, 남부지방의 도시들을 대상으로 연구를 확대하여 냉난방에너지를 절약하고 기후변화를 지연할 일반적인 도시녹지계획 방안이 마련되어야 할 것이다.

주1. 본 연구에서 도심지란 자연지 및 농경지를 제외한 도시의 다 토지이용을 지칭.

주2. 녹엽, 낙지 및 낙근에 의한 유입량에서 분해로부터의 유출량을 제감한 양을 의미.

주3. 자연 및 토지공원을 제외한 어린이 및 근린공원.

## 인용문헌

1. 강릉시(1997) 강릉통계연보
2. 권오준, 이명우, 임봉구(1996) 환경설계관계법규 교양 동별당.
3. 서울시(1997) 서울통계연보.
4. 에너지경제연구원(1997) 기후변화협약 대응 실천계획 수립을 위한 연구.
5. 에너지경제연구원(1998) 에너지의 이해.
6. 조현길(1999a) 강원도 일부도시의 경관내 탄소흡수 및 배출과 도시녹지의 역할. 한국조경학회지 27(1): 39-53
7. 조현길(1999b) 도시식생의 관리에 의한 에너지소비 및 탄소방출. 한국환경생태학회지 13(2) 101-108.
8. 조현길, 안태원(1999) 도시녹지에 의한 미기후개선의 기능. 한국조경학회지 27(4): 23-28
9. 조현길, 이경재, 권전오(1998a) 서울시의 토지이용 및 녹지구조 환경생태학회지 12(1) 30-41
10. 조현길, 이기의, 윤영환, 서우하(1998b) 강원도 일부도시들의 토지이용 및 녹지구조 한국조경학회지 25(1): 171-183.
11. 조현길, 조동하(1998) 도시 주요조경수종의 연간 CO<sub>2</sub> 흡수. 한국조경학회지 26(2) 38-53
12. 조현길, 한갑수, 서우하(1998c) 도시식생의 주택에너지절약 및 탄소배출저감 기능. 한국조경학회지 26(3) 104-117.
13. 춘천시(1997) 춘천통계연보

14. 한국토지개발공사(1993) 공원녹지계획지표 연구 기술연구 93-2.
15. Beatty, R. A.(1989) Planting guidelines for heat island mitigation and energy conservation In K. Garbest, H. Akbari, and P. Martien, eds., Proceedings of the Workshop on Energy Saving and Reducing Atmospheric Pollution by Controlling Summer Heat Islands. Berkeley, CA: University of California, Lawrence Berkeley Laboratory pp 333-343.
16. ENERCOMP. Inc (1995) MICROPASA User's Manual Sacramento, CA
17. Jo, H. K (1993) Landscape Carbon Budgets and Planning Guidelines for Greenspaces in Urban Residential Lands. Ph.D Dissertation. University of Arizona.
18. Jo, H. K. and E. G. McPherson(1995) Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management* 45. 109-133.
19. Jo, H. K. and E. G. McPherson(2000) Indirect carbon reduction by residential vegetation and planting strategies in Chicago, U.S.A *Journal of Environmental Management*(accepted).
20. McPherson, E. G (1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4). 215-223
21. McPherson, E. G., P. L. Sacamano, S. Wensman, J. Ratliff, and H. K. Jo(1993) Modeling Benefits and Costs of Community Tree Plantings Report to American Forests, U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of Energy, and USDA Forest Service
22. McPherson, E. G., R. Brown, and R. A. Rowntree(1985) Simulating tree shadow patterns for building energy analysis In A. T. Wilson and W. Glennie, eds. Solar 85-Proceedings of the National Passive Solar Conference. Boulder, CO: American Solar Energy Society, pp. 378-382
23. Miller, R. W (1997) *Urban Forestry: Planning and Managing Urban Greenspaces*. New Jersey. Prentice Hall
24. Minnesota Department of Natural Resources(1991) Carbon Dioxide Budgets in Minnesota and Recommendations on Reducing Net Emissions with Trees Report to the Minnesota Legislature.
25. 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.
26. Rowntree, R. A.(1989) *Urban Forestry, Carbon Dioxide and Global Climate Change*. Presented at the Urban Forestry Working Group Technical Session at the SAF National Convention held at Spokane, WA on Sep. 21-27.