

도시식생의 주택에너지절약 및 탄소배출저감 기능

-춘천시를 대상으로-

조현길* · 한갑수** · 서옥하*

*강원대학교 녹지조경학과 · **강원대학교 대학원

Function of Home Energy Savings and Carbon Emission Reduction by Urban Vegetation -Case of Chuncheon-

Jo, Hyun-Kil* · Han, Gab-Soo** · Seo, Ok-Ha*

*Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University

**Graduate School, Kangwon National University

ABSTRACT

Rising concern about climate change has evoked interest in the potential for urban vegetation to help reduce the level of atmospheric CO₂, a major heat-trapping gas. This study quantified the function of home energy savings and carbon emission reduction by shading, evapotranspiration and windspeed reduction of urban vegetation in Chuncheon. Tree and shrub cover averaged approximately 13% in residential land. The effects of shading, evapotranspiration and windspeed reduction annually saved heating energy by 2.2% (63,400 GJ) and cooling energy by 8.8% (2,160 MWh). The heating and cooling energy savings reduced carbon emissions by 3.0% (1,600 t) annually. These avoided emissions equaled the amount of carbon emitted annually from fossil fuel consumption by a population of about 1,230. Carbon emission reduction per residential building was 55 kg for detached buildings and 872 kg for multifamily buildings. Urban vegetation annually decreased heating and cooling energy cost by ₩1.1 billions (\$830,000, \$1=₩1,300), which were equivalent to annual savings of ₩10,000 per tree in urban lands(except natural and agricultural lands). Shading had a negative effect on heating energy savings and carbon emission reduction due to tree plantings in the wrong locations, while windspeed reduction had a great effect. Plantings of large trees close to the west and east wall of buildings, full tree plantings on the north, and avoidance of shade-tree plantings or selection of solar-friendly trees on the south were recommended to improve the function of building energy savings and carbon emission reduction by urban vegetation.

Key Words : CLIMATE CHANGE, SHADING, EVAPOTRANSPIRATION, WINDSPEED
REDUCTION, PROPER PLANTING

I. 서론

도시지역 건물주변에서의 적절한 식재는 열섬현상을 완화하고 냉난방에너지를 절약할 뿐만 아니라, 기후변화를 야기시키는 주요 온실가스(greenhouse gas)인 CO₂의 배출을 감소시킬 수 있다(Akbari *et al.*, 1988; Parker, 1989). 도시식생은 차양(shading), 증발산 및 풍속감소의 기능을 통하여 건물의 냉난방에너지 소비를 절약하고, 그 결과 대기에서의 탄소배출을 저감하는 역할을 한다. 즉, 도시식생은 건물에 도달하는 태양복사를 차단하고 증발산을 통해 건물주변 대기온도를 감소시켜 여름철 냉방에너지를 절약한다. Huang *et al.* (1992)은 수목피도 10% 증가는 냉방에너지를 도시에 따라 연간 12%(Arizona주 Phoenix시)내지 24%(California주 Sacramento시) 절약할 수 있음을 보고하였다. 그 냉방에너지절약의 대부분은 증발산의 기능에 의한 것이며, 단지 10-30%만이 차양에 기인하는 것으로 나타났다. 또한, 도시에 분포하는 수목은 표면마찰(surface roughness)을 증가시켜 풍속을 저하시킨다. 풍속감소(이하 방풍으로 약칭)는 건물내부로의 찬 바람의 침투를 막고 외부로의 열손실을 낮추어 겨울철 난방에너지를 절약한다. Huang *et al.* (1990)은 Illinois주 Chicago시의 주택주변에 식재된 교목 3주에 의한 방풍은 난방에너지를 16% 절약할 수 있음을 밝혔다. 수목의 차양, 증발산 및 방풍 기능은 Sacramento시의 경우 연간탄소배출을 약 0.4 t(metric ton)/ha을(McPherson, 1998), 그리고 Chicago시 주거지의 경우 수목피도에 따라 0.3-1.8 t/ha을(Jo and McPherson, 1998) 각각 저감하였다.

상기한 도시식생의 효과는 수목피도 및 식재패턴, 건물구조, 기후 및 냉난방기간 등의 차이에 따라 도시별로 상이할 것으로 사료된다. 그러나, 국내의 경우 도시식생의 주택에너지절약과 그로 인한 탄소배출저감의 기능을 계량화한 연구는 전무한 실정이다. 본 연구의 목적은 춘천시를 대상으로 주택구조 및 수목식재 특성, 에너지소비 등을 조사하여 식생에 의한 냉난방에너지 절약과 대기에서의 탄소배출저감을 계량화하는 것이었다. 본 연구에서 대상지는 춘천시의 시군통합 이전 행정구역만을 포함하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 컴퓨터시뮬레이션 프로그램의 활용

본 연구는 식생에 의한 에너지절약기능의 모델링을 위하여 SPS(McPherson *et al.*, 1985; 1988) 및 MICROPAS(ENERCOMP, Inc., 1995)의 두 컴퓨터시뮬레이션 프로그램을 활용하였다. SPS(Shadow Pattern Simulator)는 태양의 고도변화에 따른 월별, 시간별 수목차양에 의한 건물표면 전체의 차양계수(shading coefficient)를 산출한다. 이 프로그램은 태양, 건물 및 수목과 관련된 다양한 변수(태양각의 변화와 관련된 월일, 위도 및 경도, 건물의 길이 및 넓이, 수목의 크기 및 식재위치 등)의 입력을 필요로 한다(McPherson *et al.*, 1985; 1988; Jo, 1993; McPherson, 1994). SPS 시뮬레이션을 통하여 생성된 파일은 MICROPAS에 입력되어 차양효과를 반영한 건물에너지절약량을 산정하게 된다. SPS의 시뮬레이션은 수목의 크기(수고 및 수관폭)와 위치(건물을 중심으로 한 방위와 거리)에 매우 민감한 반면, 수중에 따라 큰 차이가 없는 수관밀도(McPherson, 1984)는 비교적 덜 민감하게 반응한다.

MICROPAS는 마이크로컴퓨터용 건물에너지 시뮬레이션 프로그램으로서, 열전도와 관련된 건물의 구조(냉난방 면적 및 체적, 창과 벽의 면적 및 열관류율 등), 냉난방시설 및 이용의 특성(거주자 및 세대수, 냉난방 설정온도 등) 및 기상자료의 입력을 토대로 월별 및 시간별 건물에너지이용량을 산출한다(Nittler and Novotny, 1983; McPherson *et al.*, 1988; Jo, 1993; McPherson, 1994; ENERCOMP, Inc., 1995). MICROPAS는 그 제작회사인 ENERCOMP에서 제공된 매월 및 매시간의 온도, 일조, 풍속 등을 포함하는 기상파일을 필요로 한다. MICROPAS의 시뮬레이션은 창의 방향별 면적 및 열관류율, 냉난방설비의 효율성, 냉난방 온도조절 등에 매우 민감하게 반응한다. 벽의 면적 및 열관류율은 창보다는 그 모델링 결과에 덜 영향을 미치나, 냉난방에너지 부하량 산정과 관련하여 무시할 수 없는 주요한 변수이다.

MICROPAS에 의해 모델링된 건물에너지이용량

은 실제건물의 에너지이용량과 근접하며, 그 연산방식이 타당성을 가지고 있다는 것이 입증되었다 (McPherson, 1994). MICROPAS는 건물에너지이용량 산정을 위하여 미국의 건축 및 에너지전문가와 관련 공공기관에서 광범위하게 활용되고 있다. MICROPAS의 건물에너지이용 모델링의 결과는 다른 유사 프로그램인 DOE 및 CALPAS를 이용한 경우와 유의한 차이가 없었다(Nittler and Novotny, 1983). 그럼에도 불구하고, MICROPAS는 시물레이션 과정이 더욱 쉽고 그에 소요되는 시간도 짧은 장점을 지닌다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 MICROPAS를 선정 활용하였다. 수목차양을 시물레이션하는 SOLPLOT, SALADDS 등의 몇몇 프로그램들 중(Minnesota Department of Natural Resources, 1991), SPS 파일만이 현재 MICROPAS에 입력가능하므로 SPS를 본 연구에서 이용하였다. Figure 1은 건물에너지절약 및 탄소배출저감을 계량화하기 위해 수행된 SPS 및 MICROPAS 시물레이션의 과정을 단순화한 것이다.

2. 주택건물구조 조사 및 MICROPAS 파일작성

축척 1/10,000의 지도상에 가로 2 cm × 세로 4 cm의 격자가 그려진 투명셀로판지를 올려놓고, 체계적 표본추출(systematic sampling)에 의해 총 126 개의 주택건물들을 표본추출하였다. 현지답사를 통하여 그들의 현관방위, 길이 및 넓이, 층수, 벽재료 및 두께, 창면적, 지붕형태 등을 조사하였고, 아울러 거

주자와의 인터뷰를 통해 건축년도, 거주자수, 세대수 등을 조사하였다. 건물벽의 재료 및 두께에 대한 조사결과와 임택(1992)의 계산식에 근거하여 벽의 열관류율을 산정하였다.

건물의 다양한 구조적 특성의 고려로부터 야기되는 에너지절약 모델링의 막대한 시간과 노력을 간소화하기 위하여, 주택건물을 조사결과에 근거하여 춘천시 의 경우를 대표할 수 있도록 유형화하였다. 즉, 건축년도를 우선적으로 고려하여 1980년 이전(1980년 포함)에 지어진 단독주택(이하 구단독주택으로 약칭), 80년 이후의 단독주택(이하 신단독주택으로 약칭), 90년 이후(1990년 포함)에 지어진 다세대주택(이하 신다세대주택으로 약칭) 등 3가지 유형으로 분류하였다. 그 이유는 건물의 냉난방에너지 모델링에 민감하게 반응하는 열관류율에 대한 법이 1980년에 제정되어(건설부, 1994), 에너지이용합리화와 관련하여 건물의 구조적 변화가 수반되었기 때문이다. 분석결과에 근거하여, 구단독주택은 다시 단층의 남향 및 서향건물, 신단독주택은 2층의 남향 및 동향건물, 신다세대주택은 동향 및 북향건물 등 총 6개의 건물유형으로 세분화되었다. 신다세대주택의 층수는 실제 평균 13층이나, 고층에서는 식생에 의한 에너지절약효과가 별로 없을 것이라는 판단하에 3층으로 제한하여 모델링하였다. Table 1은 건축년도를 기준으로 유형화된 3가지 주택건물의 구조적 특성과 건물에너지이용량 분석을 위해 마련된 건물유형별 MICROPAS 파일의 주요한 입력자료를 요약한 것이다. 여기에서 냉난방상면적(conditioned floor area, 이하 상면적

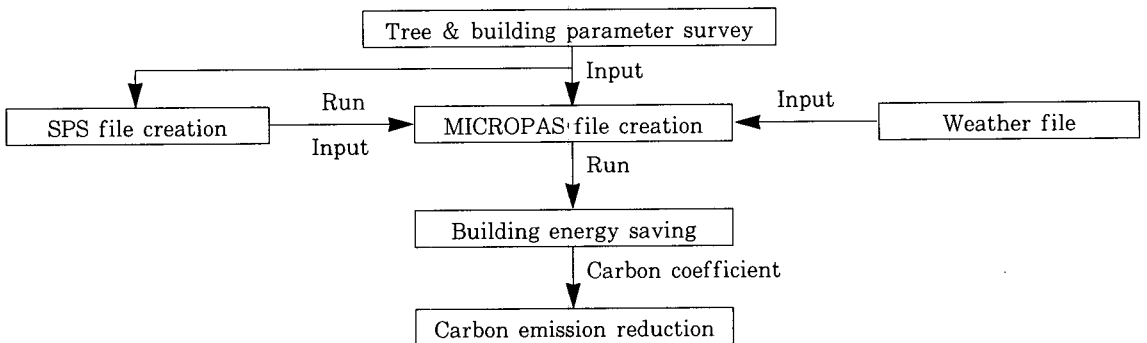


Figure 1. Simplified flowchart of SPS and MICROPAS simulation to quantify building energy saving and carbon emission reduction

Table 1. Prototype building characteristics and input data for MICROPAS modeling

Building feature	Pre-1980	Post-1980	Post-1990
	detached	detached	multifamily
Year built	≤1980	>1980	≥1990
No. of story	1	2	3
Front orientation	South/West	South/East	North/East
Construction type	Block	Brick	Iron concrete
Floor dimensions (m)	11.9x6.9	11.5x8.4	52.8x11.8
Conditioned floor area (m ²)	75.8	169.4	1,741.8
Conditioned volume (m ³)	170.5	381.2	3,920.0
No. of units/occupants	1/5	2/8	18/72
Window area (m ²)			
Front	2.9	12.6	193.2
Back	1.4	4.2	172.2
Left	1.2	5.4	0.0
Right	1.4	4.2	0.0
Total	6.9	26.4	365.4
Window panes (no. & u)	1 & 3.52	2 & 2.88	2 & 2.58
Window shading coefficient			
Glass only	0.77	0.48	0.48
Drapes or blinds	0.78	0.63	0.63
Wall insulation (R-value)	0.56	1.89	2.04/2.63*
Attic insulation (R-value)	2.92	2.92	2.92
Infiltration shielding	2	2	2
Wind correction factor	0.25	0.4	0.4
Gas furnace efficiency	0.76	0.76	0.76
Thermostat	No setback	Setback	Setback
Winter heating (°C)	21.1	21.1	21.1
Summer cooling (°C)	25.6	25.6	25.6
Energy use intensity			
Winter heating (MJ/m ²)	1,432.8	1,015.0	629.9
Summer cooling (kWh/m ²)	14.1	7.9	4.0

Note: * 2.04=Front and back wall, 2.63=Left and right wall.

으로 약칭), 세대 및 거주자수, 창면적, 벽의 열관류율 등 각 변수들의 수치는 표본추출된 유형별 주택들의 평균치이다.

3. 에너지소비량 조사 및 모델링 검증

건물의 구조적 특성조사를 위해 선정된 주택들 중, 구단독주택 및 신단독주택 각각 32동과 신다세대주택 30가구를 임의로 표본추출하여, 연간 난방에너지 소비량(1996년)을 조사하였다. 도시가스의 소비량은 거주자의 허가를 받아 춘천시의 유일한 도시가스 공급 업체인 대일도시가스로부터 수집되었다. 석유, 연탄

등의 소비량은 단독주택의 경우 인터뷰와 증빙자료에 근거하여, 그리고 공동주택의 경우 관리사무소와 판매업체의 협조에 의한 자료수집을 통해 파악되었다.

주택건물유형별 실제의 난방에너지소비량은 MICROPAS 모델링을 통해 산정된 난방에너지이용량과 비교 검증되었다. 이는 MICROPAS 모델링을 위해 요구되는 각종 변수들의 입력자료의 타당성과, 식생에 의한 에너지절약모델링 결과의 신뢰성을 증진하기 위함이었다. 모델링의 결과가 실제의 난방에너지소비량과 유사하도록, 정확한 입력자료의 확보가 난이하였던 변수들(예를 들면, 냉난방 설정온도, 냉난방설비의 효율성 등)을, MICROPAS 활용지침(ENERCOMP, Inc., 1995)에 따라 약간씩 조정하면서(model parameterization) 반복 시뮬레이션하였다. 실제의 난방에너지소비와 모델링 결과의 오차는 구단독주택과 신다세대주택이 각각 3%, 그리고 신단독주택이 4% 이내이었다.

전기한 바와 같이, MICROPAS는 건물에너지분석을 위해 그 제작회사인 ENERCOMP에서 마련하는 연 365일 매시간의 온도, 일조, 풍속 등의 기상파일을 필요로 한다. 본 연구에서는 MICROPAS 모델링을 위해 활용가능한 춘천시의 기상파일 작성이 난이하여, ENERCOMP가 제공한 기상파일들 중 춘천시와 가장 근접한 기후조건을 가진 미국 Chicago시의 것을 응용하였다. 모델링에 비교적 민감한 인자체인 온도, 일조 및 풍속을 중심으로, 양도시의 과거 30년간(1962-1991)의 기상자료(NOAA, 1993; 춘천기상대와의 사신, 1996)를 비교하였다. 평균온도는 여름철에 춘천 23.3°C, Chicago 22.0°C이었고, 겨울철에 춘천 -3.2°C, Chicago -4.1°C이었다. 연평균일조율은 춘천 48%, Chicago 54%이었다. 이처럼, 온도 및 일조의 경우 양도시간 대폭적인 차이는 없었다. 그러나, 연평균풍속은 춘천 1.6 m/s, Chicago 4.6 m/s로서 Chicago가 약 3배 높았다. 풍속차이는 MICROPAS의 풍속관련 변수를 조절하여 그 차이에 기인되어 나타날 수 있는 건물에너지분석의 오차를 최소화하였다. 상기한 건물의 실제 에너지소비량과 모델링된 에너지이용량의 유사화 과정은 또 다른 측면에서의 Chicago시 기상파일 이용의 한계성을 보완하기 위함이었다.

에너지소비량 조사를 위해 표본추출된 92개 가구

들 중에서 단지 6개 가구만이 냉방기를 갖추고 있었고, 한국전력공사로부터 주택들의 냉방에너지소비량 자료를 구입하는 것도 불가능하였다. 따라서, 실제의 냉방에너지소비 계량화는 무시되었고, 대신 현주택의 구조적 특성을 반영한 MICROPAS 모델링 결과의 가정된 냉방에너지이용량(Table 1 하단 참조)을 기준으로, 식생에 의한 에너지절약을 계량화하였다.

4. 수목조사 및 차양기능 모델링

주택건물의 조사시 해당 건물주변에 식재된 수목의 수종, 수고, 흉고직경, 수관폭 및 수관고, 건물로부터의 식재방위 및 거리 등을 조사하였다. 수목의 흉고직경은 직경줄자, 수고는 측고기, 그리고 방위는 나침반을 이용하여 측정하였다. 건물의 유형화 경우처럼 SPS 시뮬레이션의 시간과 노력을 간소화하기 위해 조사결과에 근거하여, 춘천시를 대표할 수 있도록 주택주변 수목식재특성을 유형화하여 차양시나리오를 작성하였다.

Table 2와 같이, 수목의 크기는 수고 × 수관폭을 4 m × 3 m(이하 소형 수목으로 약칭), 7 m × 5 m(이하 중형 수목으로 약칭), 10 m × 7 m(이하 대형 수목으로 약칭) 등의 3가지 유형으로 구분되었다. 시뮬레이션된 수목들은 조사결과에 준하여 모두 우산형(paraboloid)의 낙엽수이었다. 그 낙엽수들의 수관은 기존 연구결과(McPherson, 1984; McPherson et al., 1993)에 입각하여, 성장기간 동안(5-10월)에는 태양광의 15%만을 투과시키며, 낙엽된 겨울철에는 75%를 투과시키는 것으로 가정하였다. Figure 2는 SPS 시뮬레이션을 위해 유형화된 주택건물로부터의 수목식재 방위와 거리를 보여 준다. 수목크기와 식재거리에 따른 차양가능성을 고려하여, 건물로부터 북

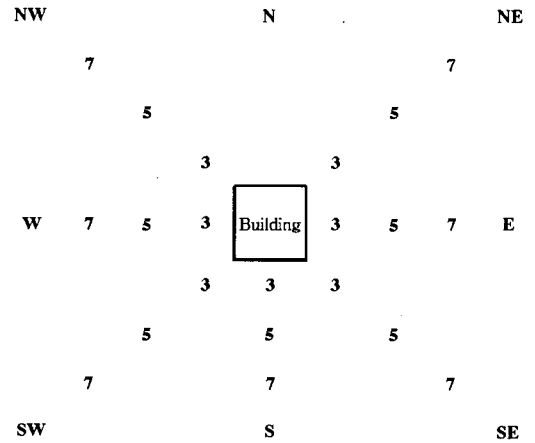


Figure 2. Distance and directional coordinates of shade trees from residential building (unit of figures: m)

향을 제외한 7개의 방위(동북, 동, 동남, 남, 서남, 서, 서북)별로 3, 5 및 7 m의 거리에 위치시킨 각 수목의 차양효과를 시뮬레이션하였다. 즉, 건물로부터 3 m의 거리에는 소형 및 중형 수목을, 5 m의 거리에는 중형 및 대형 수목을, 그리고 7 m의 거리에는 대형 수목만을 각각 위치시켰다(방위별 5개 수목 위치).

건물주변 7개의 방위별 5개 수목의 차양효과를 시뮬레이션하여 총 35개의 SPS 파일을 생성하였다. 이들 SPS 파일을 6개 건물유형별 MICROPAS 파일에 연결하여 총 210개 경우의 차양기능을 모델링하였다. 각 수목당 차양에 의한 냉방에너지절약량을 현지조사된 주택주변 유사유형의 수목들에 적용하여, 건물유형별 각 주택의 총 냉방에너지절약량을 산정하였다.

5. 증발산 및 방풍기능 모델링

증발산 및 방풍에 의한 냉난방에너지의 절약효과는 단지 건물을 차양하는 개개의 수목뿐만 아니라, 일정 거주지역에 분포하는 모든 식생의 종합적인 영향에 기인한다. 기존의 연구들에 의하면(Huang et al., 1987; Profous, 1992; Jo, 1993), 수목피도 10% 증가는 여름철 건물주변 온도를 0.5-1℃ 감소시킨다. 본 연구에서는 이러한 연구결과를 검증하기 위하여,

Table 2. Tree characteristics as SPS input data

Parameter	Small	Medium	Large
Crown width (m)	3.0	5.0	7.0
Crown height (m)	2.6	5.2	6.9
Bole height (m)	1.4	1.8	3.1
Tree height (m)	4.0	7.0	10.0
Shape	Paraboloid	Paraboloid	Paraboloid
Summer shading coefficient	0.15	0.15	0.15
Winter shading coefficient	0.75	0.75	0.75

외관상 식생피도 차이가 인정되는 3개 장소를 선정하고 식생피도에 따른 온도차이를 조사하였다.

선정된 장소는 도심내 주간선도로들인 신흥로의 팔호광장인접지(이하 팔호광장으로 약칭) 및 중앙로의 춘천세무서인접지(이하 중앙로로 약칭)와 강원대학교 인문대학관주변(이하 강원대로 약칭)이었다. 대기온도는 휴대용 온습도계(Teston의 TH-100)를 이용하여(야간의 경우 전자식자기온습도계 이용: Sato의 R-704), 식물의 생장기간인 5월부터 10월까지(1996년) 매월 초, 중 및 하순의 3일을 임의로 선정하여, 해당일 오전 8시경부터 익일 오전 5시경까지 3시간 간격으로 8회에 걸쳐 측정되었다. 장소별 중심지점에서 8개의 등방향으로 30 m의 반경을 긋고, 방향별로 1개의 임의표본추출지점을 선정하여(random number 이용) 각 장소에서 총 8개의 식생피도 조사지점을 결정하였다. 현지답사를 통해, 표본추출지점의 가장 가까이에 위치하는 주택 또는 건물의 부지경계내에 분포하는 식생피도 및 투수성 면적을 측정하였다. 실측결과는 기존의 연구결과와 유사하게, 수목피도가 10% 더 많은 장소에서 평균온도가 약 1℃ 낮았다(Table 6 참조).

한편, 1992년 9월에 촬영된 축척 1/15,000의 흑백항공사진을 활용하여 춘천시 행정동별 주거지구의 수목피도 차이를 분석하였다. 항공사진상에 0.5 cm 간격의 격자를 그린 투명셀로판지를 중첩시켜, 체계적 표본추출을 통해 총 985개의 표본추출지점을 선정하였다. 8배 확대경이 부착된 입체시경(mirror stereoscope: Sokkisha의 MS-27)을 이용하여 수목 및 토지피복유형을 판독하였다. 그리고, 0%, 10% 및 20%의 수목피도급으로 해당 행정동들을 분류하였다. 행정동별 수목피도급과 예측된 온도차이를 고려하여, 냉방기간인 6-8월을 대상으로 오전 6시부터 오후 11시까지, MICROPAS 기후파일의 매일 및 매시간의 온도를 최대 1℃ 및 2℃로 낮추어 수정하였다. 이들 두종류의 기후파일을 건물유형별로 마련된 MICROPAS 파일들에 입력하여, 10% 및 20% 피도의 영향을 각각 반영하는 수목의 증발산기능을 모델링하였다.

주거지에서 수목피도의 10% 증가는 주거밀도에 따라 풍속을 10-20% 감소시킨다(Heisler, 1989; Myrup *et al.*, 1993). MICROPAS는 건물내부로

의 공기유입률(air infiltration rate)에 미치는 수목의 효과를 고려하기 위하여 방풍척도(wind shielding class) 변수를 이용한다(ENERCOMP, Inc., 1995). 연구대상지의 행정동별 수목피도급과 상기 연구결과들에 근거하여, 10% 수목피도에 의한 10% 풍속감소 및 20% 수목피도에 의한 20% 풍속감소에 각각 해당하는 방풍척도 변수의 조절을 통하여, 건물유형별 수목의 방풍기능을 모델링하였다.

6. 탄소배출저감량 산정

냉난방에너지 절약량은 석유, 가스, 연탄, 전기 등 에너지원별 탄소배출계수와 건물유형별 에너지원의 소비구성비를 파악하여 탄소배출저감량으로 전환되었다. 석유류는 1 L(리터)당 등유 0.68 kg, 경유 0.73 kg 및 B-C유 0.82 kg의 탄소배출계수(에너지관리공단, 1996)를 적용하였다. 도시가스(춘천시의 경우 LPG가 공급되며, 주성분은 프로판임)는 1 kg당 0.82 kg, 그리고 연탄은 1 t당 0.55 kg의 탄소배출계수(에너지관리공단, 1996)를 각각 적용하였다. 난방에너지절약에 의한 탄소배출저감량은 각 건물유형의 에너지원별 소비구성비와 표준발열량(통상산업부, 1996)에 준하여, 구단독주택(등유 및 경유 79%, 연탄 20% 차지)은 0.0150 kg/MJ, 신단독주택(등유 및 경유 93%)은 0.0182 kg/MJ, 그리고 신다세대주택(도시가스 58%, B-C유 42%)은 0.0178 kg/MJ의 비율로 산정되었다. 냉방에너지인 전기의 경우, 공급되는 총전력 중 수력, 원자력 및 화력의 전력원별 구성비를 파악한 후, 화력발전은 석탄, 석유 및 가스로부터의 발전량 구성비(한국전력공사와의 사신, 1997)를 산출하여, 1 kWh당 탄소 0.2247 kg의 비율로(Sampson *et al.*, 1992) 탄소배출저감량을 산정하였다. 원자력 및 수력발전에 의한 탄소배출은 극히 저량이므로(DeCicco *et al.*, 1990; Rowntree and Nowak, 1991) 그 산정에서 배제되었다. 행정동별 식생에 의한 단위상면적당 탄소배출저감량을 파악된 해당동 총주택수의 상면적(춘천시청 주택과와의 사신, 1997)에 곱하여, 춘천시 전체주택을 대상으로 한 총탄소배출저감량을 산출하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 주택건물 및 수목식재 현황

표본추출된 총 126동의 주택건물중 단독주택이 약 85%, 다세대주택이 15%를 각각 차지하였고, 단독주택 중 구단독주택이 약 60%, 신단독주택이 40%를 점유하였다. 건물의 현관방위는 구단독주택에서 남향 및 서향이 약 75%를, 신단독주택에서 남향 및 동향이 80%를, 그리고 신다세대주택에서 북향 및 동향이 70%를 차지하였다. 단층 및 한세대의 평균 상면적은 구단독주택 75.8 m², 신단독주택 84.7 m² 및 신다세대주택 100.1 m²인 것으로 나타났다. 벽체의 평균 열관류율은 구단독주택 1.79 kcal/m²h²°C 및 신단독주택 0.53 kcal/m²h²°C이었으며, 신다세대주택의 경우는 0.38(측면)-0.49(전후면) kcal/m²h²°C이었다. 상면적당 연간 난방에너지소비량은 구단독주택이 평균 1,390.3±161.6(표준오차) MJ/m², 신단독주택이 1,062.2±116.2 MJ/m², 그리고 신다세대주택이 613.1±14.0 MJ/m²이었다. 이처럼, 구주택보다는 신주택이, 그리고 단독주택보다는 다세대주택이 단열처리가 양호하고 단위상면적당 에너지소비도 적은 것으로 분석되었다.

차양효과가 유의할 것으로 예측된 수고 3 m × 수관폭 2.5 m 크기 이상의 차양수목들을 대상으로 분석한 결과, 총출현종수는 단독주택 25종, 다세대주택 13종이었다. 상대적으로 출현개체수가 많은 수종들은 단독주택에서는 대추나무(*Zizyphus jujuba* var. *inermis*), 자두나무(*Prunus salicina*), 밤나무(*Castanea crenata*) 등의 과수류였고, 다세대주택에서는 은행나무(*Ginkgo biloba*), 단풍나무류(*Acer* spp.), 느티나무(*Zelkova serrata*) 등이었다. 차양수목들 중, 낙엽수가 단독주택에서 약 85%, 다세대주택에서 92%를 각각 차지하였고, 우산형의 수형이 단독주택에서 85%, 다세대주택에서 98%를 점유하였다. 수고는 10 m, 수관폭은 7 m 이내인 수목들이 우점하였고, 건물로부터의 식재거리는 대부분 7 m 이내인 것으로 나타났다. 춘천시 주거지전체의 평균 수목피도와 투수성 면적은 각각 13% 및 26%이었다.

2. 차양기능

Table 3과 같이, 차양에 의한 냉난방에너지절약의 효과는 수목의 크기, 건물로부터의 식재방위 및 거리, 건물유형 등에 따라 상이하였다. 냉방에너지절약의 경우 건물의 동향과 서향에 가까이 식재된 수목의 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 그 절약효과가 가장 컸던 수목은 건물동향으로 3 m 및 5 m의 거리에 식재된 중형 및 대형 수목이었다. 이들 수목은 단독주택의 냉방에너지를 수목 1주당 5-6%, 그리고 다세대주택의 냉방에너지를 약 1% 절약하였다. 다세대주택의 냉방에너지 절약효과가 단독주택의 경우에 비해 적은 이유는 수목 1주당 차양되는 다세대주택의 벽면적이 단독주택보다 상대적으로 훨씬 크기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 건물의 동향에 위치한 수목들은 겨울철 오전의 태양광선을 차단하여 난방에너지요구를 오히려 증가시키는 역효과를 나타냈다. 그 난방에너지 증가량은 단독주택의 경우 최대 0.5%, 다세대주택의 경우 최대 0.3%이었다. 동남향, 남향 및 서남향의 식재방위는 그러한 역효과로부터 냉방에너지의 절약에 비해 난방에너지의 요구가 상대적으로 큰 곳이었다.

타 연구들(Minnesota Department of Natural Resources, 1991; McPherson *et al.*, 1993; McPherson, 1994; Jo and McPherson, 1998)역시 본 연구결과와 유사하게, 차양에 의한 냉방에너지절약의 효과가 가장 양호한 식재방위는 건물의 서향 및 동향이며, 남향의 차양수목은 오히려 난방에너지이용을 증가시킨다고 보고하였다. Jo and McPherson(1998)에 의하면, 단독주택의 동향 및 서향 수목은 냉방에너지를 본 연구의 결과보다 많은 7-8% 절약하였는데, 이는 그 차양수목의 크기가 본 연구대상의 수목보다 더욱 크기 때문이었다. 건물의 서향에 위치한 중형 및 대형 수목들은 건물에 도달하는 오후의 일사량을 감소시켜, 냉방에너지를 단독주택은 1-3%, 그리고 다세대주택은 0.1-0.3% 절약하였다. 서향 수목들의 경우, 겨울철 난방에너지증가와 관련된 역효과는 거의 없었으며, 3 m 거리의 중형 수목과 5 m 거리의 대형 수목은 여름철 최대시냉방에너지(peak cooling energy)를 최대 0.3% 부가적으로 절약하였다. 최대시냉방에너지는 냉방전력부하

Table 3. Shading effect of different tree sizes and locations on mean annual energy saving (%) of each prototype building*

Shading type			Detached		Multifamily	
Direction	Size	Distance**	Heating	Cooling	Heating	Cooling
NE	Small	3	0	0	0	0
NE	Medium	3	-0.01	0.23	0	0
NE	Medium	5	0	0.10	0	0
NE	Large	5	-0.01	0.10	0	0
NE	Large	7	0	0.08	0	0
E	Small	3	-0.29	1.35	-0.25	0.42
E	Medium	3	-0.49	4.66	-0.30	0.91
E	Medium	5	-0.42	3.25	-0.28	0.67
E	Large	5	-0.51	5.80	-0.01	0.14
E	Large	7	-0.40	3.21	-0.01	0.11
SE	Small	3	-0.15	0	-0.13	0
SE	Medium	3	-0.45	0.29	-0.20	0.11
SE	Medium	5	-0.24	0.01	-0.14	0
SE	Large	5	-0.45	0.22	-0.37	0.08
SE	Large	7	-0.30	0.01	-0.21	0
S	Small	3	-0.15	0	-0.08	0
S	Medium	3	-0.43	0.58	-0.13	0.08
S	Medium	5	-0.26	0.16	-0.10	0
S	Large	5	-0.48	0.43	-0.17	0.05
S	Large	7	-0.25	0.03	-0.14	0
SW	Small	3	-0.01	0	0	0
SW	Medium	3	-0.08	0.20	-0.01	0.02
SW	Medium	5	-0.04	0	0	0
SW	Large	5	-0.19	0.29	-0.02	0.01
SW	Large	7	-0.06	0.02	-0.01	0
W	Small	3	-0.01	0.30	-0.01	0.07
W	Medium	3	-0.05	1.40	-0.01	0.33
W	Medium	5	-0.03	0.94	-0.01	0.13
W	Large	5	-0.07	2.52	0	0.06
W	Large	7	-0.04	1.52	0	0.06
NW	Small	3	0	0	0	0
NW	Medium	3	0	0.03	0	0
NW	Medium	5	0	0.01	0	0
NW	Large	5	0	0.02	0	0.01
NW	Large	7	0	0	0	0

Note: * Negative values mean increase of heating energy use due to winter shade.
 ** It indicates distance from wall in meter.

가 최대한 시간에 요구되는 것으로서, 그 절약은 특히 여름철 전력부족을 완화하는데 기여할 수 있다. 건물의 동북 및 서북향에 위치한 차양수목들은 냉난방에너지절약에 뚜렷한 영향을 미치지 않았다.

Table 4는 표본추출된 주택건물 주변에 식재된 모든 차양수목들의 건물유형별 단위상면적당 연간에너지절약 및 탄소배출저감량을 보여 준다. 단독주택에서, 수목차양은 냉방에너지를 평균 0.61 ± 0.19 (표준오차) %인 80 Wh/m^2 절약하였으나 난방에너지를 0.14 ± 0.03 % (1.7 MJ/m^2) 더 요구하여, 대기에의 탄소배출을 연간 0.05 ± 0.01 % (14.7 g/m^2) 증가시켰다. 다세대주택의 경우는 냉방에너지를 평균 0.21 ± 0.07 % (10 Wh/m^2) 절약한 반면 난방에너지를 0.35 ± 0.10 % (2.2 MJ/m^2) 증가시켜, 탄소배출을 연간 0.31 ± 0.09 % (35.3 g/m^2) 상승시켰다. 차양에 의한 최대시냉방에너지의 절약은 단독주택에서 평균 0.04%이었고 다세대주택에서는 미미하였다. 수목차양이 오히려 대기에의 연간탄소배출을 증가시킨 이유는, 수목을 부적절한 방향에 식재하여 여름철 냉방에너지의 절약 이상으로 겨울철 난방에너지의 많은 요구를 초래하였고, 게다가 냉방에너지보다는 난방에너지의 소비에 의한 탄소배출량이 8-10배 더 많았기(전체의 90% 차지) 때문이다.

에너지절약상 부적절한 방향에 식재된 동남향, 남향 및 서남향의 현존 차양수목수는 Table 5에 요약하였듯이, 단독주택 및 다세대주택 모두에서 총차양수목수의 약 50%를 점유하였다. 차양에 의한 난방에너지절약 및 탄소배출저감의 역효과를 최소화하기 위해, 건물주변 모든 방향에 많은 수목을 식재하기보다는 적절한 방향에 적절한 수목을 식재하는 전략이 강조되어야 할 것이다. 또한, 남향에는 차양수목의 식재를 회피하거나 태양친화적 수목(solar-friendly

Table 4. Effects of all shade trees on annual energy saving and reduction of carbon emission per m² of conditioned floor area of residential buildings sampled in Chuncheon*

Prototype building	Energy saving						Carbon reduction	
	Heating		Cooling		Peak**		g	%
	MJ	%	kWh	%	Wh	%		
Detached	-1.70±0.42	-0.14±0.03	0.08±0.02	0.61±0.19	0.011±0.005	0.040±0.018	-14.7±4.7	-0.05±0.01
Multifamily	-2.21±0.65	-0.35±0.10	0.01±0.00	0.21±0.06	0.001±0.000	0.004±0.002	-35.3±10.2	-0.31±0.09

Note: * The figures indicate mean±standard error.

** It indicates peak cooling occurred on 3 pm, July day 1 (the same with subsequent tables).

Table 5. Distribution of existing shade trees by tree sizes and planting directions from residential buildings sampled in Chuncheon (%)

Prototype building	Size	Direction							Total
		NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Detached	Small	0	18.1	6.6	9.8	9.8	8.2	1.6	54.1
	Medium	0	3.3	9.8	6.6	4.9	14.8	3.3	42.7
	Large	0	0	1.6	1.6	0	0	0	3.2
	Total	0	21.4	18.0	18.0	14.7	23.0	4.9	100
Multifamily	Small	16.5	8.8	5.0	23.4	3.1	11.3	2.5	70.6
	Medium	2.5	4.4	0.6	11.9	3.8	5.0	0.6	28.8
	Large	0	0	0	0	0	0.6	0	0.6
	Total	19.0	13.2	5.6	35.3	6.9	16.9	3.1	100

tree)을 식재하여, 벽면과 창외 겨울철 태양광선을 확보하는 것이 바람직할 것이다. 여기에서, 태양친화적 수목이란 봄의 개엽시기가 늦은 반면 가을의 낙엽시기가 이르고, 낙엽된 후 가지밀도가 낮은 낙엽수를 의미한다(예를 들면, 층층나무, 회화나무, 은행나무, 팽나무 등). 본 연구에서 시물레이션된 수목은 모두 낙엽수이었는데, 상록수는 난방에너지의 절약에 더욱 부정적인 효과를 야기시킬 것으로 판단된다.

3. 증발산 및 방풍기능

Table 6은 측정장소별 수목피도, 투수성 면적 및 시간별 온도변화(1996년 생장기간 평균)를 보여 준다. 강원대는 팔호광장보다 수목피도가 약 10%, 투수성 면적이 30% 더 많았으며, 강원대에서의 평균온도가 팔호광장보다 약 1°C 더 낮았다. 세장소에서의 하루 중 시간별 온도차이는 이른 새벽시간에는 별로 없으나, 나머지 주간의 시간대에서 야간 11시경까지 나타났다. 특히, 수목의 증발산작용이 활발한 오후 2시-5시경에 중앙로/강원대와 팔호광장간의 온도차는 뚜렷하였다(0.8-1.2°C). 오후 8시-11시경까지 계속 강원대의 온도가 팔호광장 및 중앙로보다 낮은 이유

는, 낮에 흡수한 열을 밤에 서서히 방출하는 포장 및 건물면적이 강원대에서 상대적으로 적기 때문인 것으로 생각된다.

Table 7은 식생의 증발산이 건물유형별 단위상면적당 연간에너지절약 및 탄소배출저감에 미치는 효과를 나타낸다. 수목피도가 10%일 경우, 그 증발산기능은 건물유형에 따라 냉방에너지를 7-10%(390-970 Wh/m²), 그리고 최대시냉방에너지를 3%(0.4-0.8 Wh/m²) 절약하였으며, 대기로의 탄소배출을 연간 약 0.7-0.9%(90-220 g/m²) 저감하였다. 수목피도가 20%일 경우의 증발산은 냉방에너지를 12-19%(640-1,830 Wh/m²), 최대시냉방에너지를 8-9%(1-2 Wh/m²) 각각 절약하였으며, 대기로의 탄소배출을 연간 1.3-1.9%(145-410 g/m²) 저감하였다. 식생의 증발산이 겨울철 난방에너지소비에 미치는 영향은 없었다.

Table 8은 식생의 방풍이 건물유형별 단위상면적당 연간에너지절약 및 탄소배출저감에 미치는 효과를 보여 준다. 수목피도가 10%일 경우, 그 방풍기능은 건물유형에 따라 난방에너지를 1.4-3.5%(20-22 MJ/m²), 냉방에너지를 0.2-1.8%(20-90 Wh/m²), 최대시냉방에너지를 0.4-

Table 6. Difference in woody plant cover, pervious area (including grass) and hourly mean temperature (for growing season, 1996) at three places selected in Chuncheon

Place	Cover (%)	Pervious (%)	Hourly temperature (°C)								Mean
			2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00	
Palho	6.0	0	18.2	17.7	19.9	27.1	31.9	28.8	23.2	20.3	23.4
Jungang	13.5	13.3	18.0	17.4	20.2	27.1	31.0	28.0	22.9	20.1	23.1
KNU	15.8	29.6	17.9	17.3	19.3	26.4	30.8	27.6	21.7	19.6	22.6

Table 7. Evapotranspiration effect of different vegetative cover on annual energy saving and reduction of carbon emission per m² of conditioned floor area for each prototype building

Tree/shrub cover (%)	Prototype building	Energy saving						Carbon reduction	
		Heating		Cooling		Peak		g	%
		MJ	%	kWh	%	Wh	%		
10	Pre-80 detached -S	0	0	0.94	6.7	0.8	2.7	211.2	0.9
		0	0	0.97	6.5	0.8	2.7	217.9	0.9
	Post-80 detached -S	0	0	0.65	8.2	0.6	3.0	146.0	0.7
		0	0	0.69	8.1	0.6	3.0	155.0	0.8
	Post-90 multifamily -N	0	0	0.39	9.8	0.4	3.2	87.6	0.7
		0	0	0.45	8.3	0.4	3.0	101.1	0.8
20	Pre-80 detached -S	0	0	1.79	12.7	2.5	8.2	402.1	1.6
		0	0	1.83	12.3	2.5	8.1	411.1	1.6
	Post-80 detached -S	0	0	1.25	15.8	1.7	8.8	280.8	1.4
		0	0	1.28	15.1	1.7	8.9	287.6	1.4
	Post-90 multifamily -N	0	0	0.64	16.2	1.0	8.9	143.8	1.3
		0	0	1.05	19.2	1.2	9.4	235.9	1.9

1.0% 각각 절약하였으며, 대기로의 탄소배출을 연간 1.3-3.4% (310-410 g/m²) 저감하였다. 수목피도가 20%일 경우의 방풍은 난방에너지를 3-7% (42-46 MJ/m²), 냉방에너지를 0.4-3.6% (60-200 Wh/m²), 최대시냉방에너지를 1-2% 각각 절약하였으며, 대기로의 탄소배출을 연간 3-7% (640-860 g/m²) 저감하였다.

이와 같이, 증발산과 방풍에 의한 연간에너지절약량의 비율은 단열이 양호한 건물유형일수록 높았고,

수목피도가 10%에서 2배로 증가하면 그 효과도 약 2배로 증가하였다. 미국 Chicago시 주택들의 경우, 식생에 의한 1℃ 온도감소는 냉방에너지를 8% 절약하였고, 풍속의 10% 감소차이는 난방에너지를 2% 만큼 더 절약하였다(Jo and McPherson, 1998). 본 연구에서 나타난 10% 및 20% 수목피도간의 증발산과 방풍효과는 Chicago 주택들의 그 연구결과와 유사하였다.

Table 8. Windspeed reduction effect of different vegetative cover on annual energy saving and reduction of carbon emission per m² of conditioned floor area for each prototype building

Tree/shrub cover (%)	Prototype building	Energy saving						Carbon reduction	
		Heating		Cooling		Peak		g	%
		MJ	%	kWh	%	Wh	%		
10	Pre-80 detached -S	20.2	1.4	0.04	0.3	0.1	0.4	312.0	1.3
		20.2	1.4	0.02	0.2	0.1	0.4	307.5	1.2
	Post-80 detached -S	21.2	2.1	0.06	0.8	0.1	0.6	399.3	2.0
		21.1	2.1	0.09	1.1	0.1	0.6	404.2	2.0
	Post-90 multifamily -N	22.2	3.5	0.07	1.8	0.1	0.9	409.8	3.4
		22.1	3.5	0.06	1.1	0.1	1.0	405.8	3.3
20	Pre-80 detached -S	41.6	2.9	0.06	0.4	0.2	0.8	637.5	2.6
		41.9	2.9	0.06	0.4	0.2	0.8	642.0	2.6
	Post-80 detached -S	44.7	4.4	0.13	1.6	0.2	1.2	842.7	4.2
		44.8	4.4	0.11	1.3	0.2	1.2	840.1	4.1
	Post-90 multifamily -N	46.0	7.3	0.10	2.6	0.2	2.0	839.0	7.0
		45.9	7.3	0.20	3.6	0.3	2.1	859.7	6.9

4. 종합적 효과

Table 9는 식생의 차양, 증발산 및 방풍기능의 종합적 효과에 의한 건물유형별 단위상면적당 평균 연간에너지절약 및 탄소배출저감을 요약한 것이다. 수목피도가 10%인 단독주택의 경우, 난방에너지절약량은 단위상면적당 1.6 ± 0.1 (표준오차)%인 18.9 ± 0.4 MJ/m², 냉방에너지절약량은 8.5 ± 0.2 %인 1.0 ± 0.0 kWh/m², 그리고 최대시냉방에너지 절약량은 3.4 ± 0.0 %인 0.8 ± 0.0 Wh/m²이었다. 수목피도가 10%인 다세대주택의 경우, 난방에너지절약량은 단위상면적당 3.2 ± 0.1 %인 20.0 ± 0.6 MJ/m², 냉방에너지절약량은 11.2 ± 0.2 %인 0.5 ± 0.0 kWh/m², 그리고 최대시냉방에너지 절약량은 4.1 ± 0.0 %인 0.5 ± 0.0 Wh/m²이었다. 수목피도가 20%인 단독 및 다세대주택들의 단위상면적당 연간에너지절약량은 10%인 경우보다 약 2배 더 많았다. 에너지절약에 의한 단위상면적당 연간탄소배출저감량은 수목피도가 10%인 단독주택이 2.3 ± 0.0 %인 525.4 ± 5.5 g/m², 20%인 단독주택이 4.8 ± 0.1 %인 $1,070.6 \pm 6.9$ g/m²이었다. 수목피도가 10% 및 20%인 다세대주택의 경우는 각각 3.8 ± 0.1 %인 462.1 ± 11.6 g/m² 및 8.0 ± 0.1 %인 974.8 ± 16.8 g/m²이었다.

춘천시의 총주택수는 1996년말 기준 단독주택 16,893동 및 다세대주택 772동이었다. 교외에 분포하는 칠송동, 삼천동, 사농동, 사우동, 신동 및 우두동에서의 수목피도는 21-22%이었고(20% 수목피도급으로 분류), 총주택수는 단독주택 2,333동(전체의 14%) 및 다세대주택 19동(2%)이었다. 낙후주택이 밀도높게 분포하는 소양동 및 약사동의 수목피도는 2-5%에 불과하였고(0% 수목피도급으로 분류), 총주

택수는 단독주택 1,233동(전체의 7%) 및 다세대주택 27동(3%)이었다. 기타 행정동들의 수목피도는 9-14%이었다(10% 수목피도급으로 분류). 수목피도에 따른 단위상면적당 에너지절약 및 탄소배출저감량을 해당 행정동들의 총상면적에 곱하여, 춘천시 전체주택들의 에너지절약 및 탄소배출저감량을 산정한 결과는 Table 10과 같다.

춘천시 식생은 난방에너지를 총 63,400 GJ(총소비량 2,931,270 GJ의 2.2%), 냉방에너지를 2,160 MWh(총소비량 24,480 MWh의 8.8%), 최대시냉방에너지를 2,270 kWh 각각 절약하였고, 그 절약으로부터 탄소배출을 총 1,600 t(총배출량 53,640 t의 3.0%) 저감하였다. 차양은 수목의 부적절한 식재위치에 기인되어 24 t의 탄소를 더 배출하는 역효과를 초래하였으나, 방풍은 총탄소배출저감량의 약 74%를 차지하는 주요한 기능을 담당하였다. 건물동당 탄소배출저감량은 단독주택 55 kg 및 다세대주택 872 kg이었고, 도심지(자연지, 농경지, 식생우점의 공공용지 및 행락지를 제외한 지역)의 단위면적당 탄소배출저감량은 1.41 t/ha이었다. 미국 Chicago시 주택들의 경우, 단독주택의 건물동당 탄소배출저감량은 수목피도의 차이에 따라 18-159 kg이었는데(Jo and McPherson, 1998), 춘천시의 경우는 그 중간정도에 해당하는 것으로 분석된다.

상기의 식생에 의한 연간 난방에너지절약량은, 석유(경유 및 등유) 1 L의 발열량인 8,950 kcal(통상산업부, 1996)의 소비당 450원 지출(춘천시 주유소협회와의 사신, 1998)에 준하면 약 7.6억원의 비용절약과 같았다. 연간 냉방에너지절약량은 일반주택의 1 kWh당 150원 지출 기준(한국전력공사와의 사신, 1998) 약 3.2억원의 비용절약에 해당하였다. 춘천시

Table 9. Aggregate effects of shading, evapotranspiration and windspeed reduction by vegetation on annual energy saving and reduction of carbon emission per m² of conditioned floor area for each prototype building

Prototype building	Tree/shrub cover(%)	Energy saving						Carbon reduction	
		Heating		Cooling		Peak		g	%
		MJ	%	kWh	%	Wh	%		
Detached	10	18.9±0.4	1.6±0.1	0.9±0.0	8.5±0.2	0.8±0.0	3.4±0.0	525.4± 5.5	2.3±0.0
	20	41.4±0.5	3.5±0.1	1.7±0.0	15.5±0.3	2.4±0.1	9.5±0.1	1,070.6± 6.9	4.8±0.1
Multifamily	10	20.0±0.6	3.2±0.1	0.5±0.0	11.2±0.2	0.5±0.0	4.1±0.0	462.1±11.6	3.8±0.1
	20	43.8±0.6	6.9±0.1	0.9±0.0	20.0±0.4	1.3±0.0	11.0±0.1	974.8±16.8	8.0±0.1

Table 10. Aggregate effects of shading, evapotranspiration and windspeed reduction by vegetation on annual energy saving and reduction of carbon emission for all the residential buildings in Chuncheon

Prototype building	CFA(m ²)*	Effect	Energy saving			Carbon reduction (t)
			Heating(GJ)	Cooling(MWh)	Peak(kWh)	
Detached	1,646,730	Shading	-2,801	13	18	-24
		Evapotranspiration	0	1,412	1,391	320
		Windspeed reduction	36,670	88	204	627
		Sub-total	33,869	1,513	1,613	923
Multifamily	1,344,670	Shading	-1.71	0.01	0	-0.03
		Evapotranspiration	0	559	504	126
		Windspeed reduction	29,530	87	154	547
		Sub-total	29,528	646	658	673
Total	2,991,400	Shading	-2,803	13	18	-24
		Evapotranspiration	0	1,971	1,895	446
		Windspeed reduction	66,200	175	358	1,174
		Total	63,397	2,159	2,271	1,596

Note: * CFA is short for conditioned floor area.

도심지(면적 1,130 ha)에서 흉고직경 5 cm 이상인 교목의 식재밀도는 96주/ha이므로(조현길 등, 1998), 그 교목 한 그루는 평균적으로 연간 약 10,000원의 냉난방비를 절약하는 것으로 나타났다. 춘천시의 경우, 화석연료소비를 통한 인구 1인당 연간탄소배출량은 약 1.3 t이었다(조현길 등, 1995). 식생의 주택에너지절약에 의한 탄소배출저감량은 해마다 약 1,230명이 대기에 배출하는 탄소량을 상쇄하는 셈이었다.

IV. 결론

대기탄소농도의 증가와 기후변화의 심각성은 그것의 영향을 완화 또는 지연시킬 도시식생의 잠재력에 대한 관심을 고조시키고 있다. 본 연구는 춘천시를 대상으로 식생의 차양, 증발산 및 방풍기능에 의한 냉난방에너지절약과 그로 인한 대기에의 탄소배출저감량을 계량화하였다. 주거지의 평균수목피도가 13%인 춘천시에서, 식생은 난방에너지를 연간 2.2%(63,400 GJ), 냉방에너지를 8.8%(2,160 MWh) 각각 절약하였고, 그 절약으로부터 탄소배출을 3.0%(1,600 t) 저감하였다. 그 탄소배출저감량은 해마다 약 1,230명이 화석연료소비를 통해 대기에 배출하는 탄소량을 상쇄하는 셈이었다. 건물동당 탄소

배출저감량은 단독주택 55 kg 및 다세대주택 872 kg이었다. 식생의 냉난방에너지절약은 연간 약 10.8 억원의 비용을 절감하였고, 이는 도심지(자연지 및 농경지 제외)의 교목 한 그루당 연간 약 10,000원의 냉난방비 절약에 해당하는 것이었다.

차양은 수목의 부적절한 식재위치에 기인되어 난방 에너지소비 및 탄소배출을 오히려 증가시키는 역효과를 초래하였으나, 방풍은 총탄소배출저감량의 약 74%를 차지하는 주요한 기능을 담당하였다. 식생의 에너지절약 및 탄소배출저감 기능을 증진하기 위해, 건물의 서향 및 동향 가까이에 대형 차양수목을 식재하고(동향에는 태양친화적 수목 식재), 남향에는 그것의 식재를 회피하거나 태양친화적 수목의 식재가 요구된다. 또한, 건물의 서향 및 북향에는 가능하다면 수목의 고밀식재를 통해 증발산 및 방풍효과를 최대화할 필요가 있다.

본 연구의 한계성은 MICROPAS 제작사에 의뢰해야 하는 연구대상도시의 기상파일 작성이 당장은 불가하여, 그곳에서 제공한 기상파일들 중 기후조건이 가장 유사한 미국 Chicago시의 것을 응용하였다는 것이다. 수목의 차양기능에 의한 에너지절약은 한대 및 온대지방보다는 난대지방에서 더욱 효과적일 것으로 판단된다. 향후, 국내에서 적용가능한 기상파일의 마련과 난대지방을 포함하는 타도시들을 대상으로 한 보강연구를 통해, 주택에너지절약 및 탄소배출

저감의 효과를 최대화하기 위한 주택조경계획의 일반적 지침을 모색해야 할 것이다.

감사의 글

국내 방문을 통해 건물에너지절약 모델링에 귀중한 정보와 자문을 아끼지 않은 Dr. E. Gregory McPherson(Western Center for Urban Forest Research, USDA Forest Service, Univ. of California, Davis)께 감사드린다. 또한, 주택건물 구조의 조사 및 분석에 도움을 제공한 강원대학교 건축공학과 구재오 교수께 고마움을 표한다.

인용문헌

1. 건설부(1994) 건물 에너지절약 설계기준의 체계화 연구. 건설부 보고서.
2. 에너지관리공단(1996) 지역에너지계획 수립 기본지침서.
3. 임만택(1992) 건축환경계획. 서울: 보문당.
4. 조현길, 윤영활, 이기의(1995) 도시녹지에 의한 대기 CO₂의 흡수. 한국조경학회지 23(3): 80-93.
5. 조현길, 이기의, 윤영활, 서욱하(1998) 강원도 일부 도시들의 토지이용 및 녹지구조. 한국조경학회지 25(4): 171-183.
6. 통상산업부(1996) 에너지통계연보.
7. Akbari, H., J. Huang, P. Martien, L. Rainer, A. Rosenfeld, and H. Taha (1988) The impact of summer heat islands on cooling energy consumption and CO₂ emissions. Proceedings of the 1988 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington, D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy.
8. 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.
9. ENERCOMP, Inc. (1995). MICROPAS4 User's Manual. Sacramento, CA.
10. Heisler, G. M. (1989) Site Design and Microclimate Research. Report to Argonne National Laboratory. University Park, PA: USDA Forest Service, Northeast Forest Experiment Station.
11. Huang, J., H. Akbari, and H. Taha (1990) The wind shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling requirements. ASHRAE Transactions 96: 1403-1411.
12. Huang, J., H. Akbari, H. Taha, and A. Rosenfeld (1987) The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings. Journal of Climate and Applied Meteorology 26: 1103-1116.
13. Huang, J., R. Ritschard, N. Sampson, and H. Taha (1992) The benefits of urban trees. In H. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, and S. Winnett, eds., Cooling Our Communities. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. pp. 27-42.
14. Jo, H. K. (1993) Landscape Carbon Budgets and Planning Guidelines for Greenspaces in Urban Residential Lands. Ph.D. Dissertation. University of Arizona.
15. Jo, H. K. and E. G. McPherson (1998) Indirect carbon reduction by urban vegetation and planting guidelines. Journal of Environmental Management(submitted).
16. McPherson, E. G. (1984) Planting design for solar control. In E. G. McPherson, ed., Energy-Conserving Site Design. Washington, D.C.: ASLA. pp. 141-164.
17. McPherson, E. G. (1994) Energy-saving potential of trees in Chicago. 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. 95-113.
18. McPherson, E. G. (1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. Journal of Arboriculture 24(4): 215-223.
19. McPherson, E. G., L. P. Herrington, and G. D. Heisler (1988) Impacts of vegetation on residential heating and cooling. Energy and Buildings 12: 41-51.
20. 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.
21. 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.
22. Minnesota Department of Natural Resources (1991) Carbon Dioxide Budgets in Minnesota and Recommendations on Reducing Net Emissions with Trees. Report to the Minnesota Legislature.

23. Myrup, L. O., C. E. McGinn, and R. G. Flocchini (1993) An analysis of microclimatic variation in a suburban environment. *Atmospheric Environment* 27B(2): 129-156.
24. Nittler, K. B. and R. E. Novotny (1983) MICROPAS, an annual hourly heating and cooling building simulation for microcomputers. *Progress in Passive Solar Energy Systems*. Boulder, CO: American Solar Energy Society.
25. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (1993) *Local Climatological Data*.
26. Parker, J. H. (1989) The impact of vegetation on air conditioning consumption. In K. Garbesi, H. Akbari, and P. Martien, eds., *Proceedings of the Workshop on Saving Energy and Reducing Atmospheric Pollution by Controlling Summer Heat Islands*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley Laboratory, University of California. pp. 45-51.
27. Profous, G. V. (1992) Trees and urban forestry in Beijing, China. *Journal of Arboriculture* 18: 145-153.
28. 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.
29. 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 R. N. Sampson and D. Hair, eds., *Forests and Global Change (Volume 1)*. Washington, D.C.: An American Forests Publication. pp. 51-72.