

도시 수목식재와 미기후 변화의 상관 연구

조현길* · 안태원**

*강원대학교 산림경영·조경학부 · **강원대학교 대학원 조경학과

I. 서론

도시의 에너지 수지(energy budget)는 직달일사량, 산란복사량 및 인공발생 에너지를 합한 것은 증발산 에너지(잠열: latent heat), 현열(sensible heat) 및 표면 저장 에너지를 합한 것과 같다고 해석된다(Douglas, 1983). 도시에서는 식생과 토양 대신 콘크리트 건물 및 아스팔트 포장에 우점하며, 이는 도시의 대기온도를 높이는데 일조한다. Akbari *et al.*(1992)에 따르면, 미국 St. Louis 도심의 여름철 온도는 교외지역보다 하루 중 1~4°C 더 높았고, 온도 1°C 상승은 미국 전체의 최대시 냉방 전력 요구를 약 4% 증가시키는 것으로 나타났다.

도시수목은 증발산의 기능을 통해 도시 대기를 가열하는 현열을 잠열로 전환하여 온도를 낮추고, 또한 인공구조물에 도달하는 태양복사를 차단하거나 흡수하여 구조물 표면의 저장열에 의한 대기온도 상승을 저지한다. 이러한 도시 수목의 증발산 및 차양 기능은 결국 폐열 발생과 열섬 현상을 제어하여 무더운 여름철 시민의 더위 스트레스를 완화하고, 건물 냉난방 에너지를 절약하여 대기오염물질의 배출을 저감시킨다. 싱가포르에서 가을철 하루 옥상의 열유입량(heat gain)은 불투수면 366kJ/m², 녹화면 0~29kJ/m²로서 현저한 차이를 보였다(Wong *et al.*, 2003). 수목피도가 12%인 주거지구의 온도는 수목부재 지구보다 2년의 생장기간 평균 0.5°C 더 낮았고, 피도 22% 지구의 온도는 1.2°C 더 낮았다(조현길과 野島義照, 2000). 기존 연구들(Huang *et al.*, 1987; Profous, 1992)도 유사하게 수목피도 10% 증가는 여름철 온도를 0.5~1°C 감소시킴을 보고한 바 있다.

본 연구의 목적은 수목 식재량의 차이가 도시의 여름철 미기후 변화에 작용하는 효과를 파악하여 기존 연구결과를 검증하고, 도시 에너지 수지 및 냉방 에너지 절약을 구명하는 기초정보를 구축하는 것이다. 본 연구에서, 미기후 요소는 대기온도 및 습도의 실측과 분석

에 초점을 두었다.

II. 연구방법

춘천시에서 예비조사를 통해 우선 녹지면적 차이를 토대로 다수의 미기후 측정지점을 선정하였다. 수목 효과 측정 및 해석의 신뢰성과 타당성을 감안하여, 하천에 의한 온도 완화 거리 315m(박인환 등, 2000)를 근거로 반경 300m 이내에 하천, 호수 등이 분포하는 지점은 제외하였다. 그리고, 활엽수와 침엽수의 온도 저감 차이를 고려하여 모두 활엽수가 우점하는 지점을 선정하였다. 측정지점은 미기후에 영향을 미칠 수 있는 표면 재료와 풍향을 반영하여, 대체로 도로의 폭과 방향, 인접 건물의 높이가 유사한 도로변을 선정하였다. 총 6개의 측정지점을 최종 선정하였으며, 이들 중 3개소는 녹지면적이 상대적으로 적은 도심에, 나머지 3개소는 녹지가 비교적 풍부한 강원대학교 구내에 위치하였다.

선정지점을 실사하여 직경 30m의 원내에 분포하는 녹지면적, 수목피도, 수관체적, 표면재료 유형별 면적 등을 실측하였다. 지상 3m 높이에 자동기상측정기(Campbell Scientific Inc. Tripod Weather Station; Sato R-704)를 설치하고, 7월 하순, 8월 중순, 9월 중순의 맑은 날 3회에 걸쳐 하루 24시간 동안 온도, 습도, 풍향, 풍속 및 광도를 측정하였다. 본 측정은 여름철을 대상으로 하였으나 8월 하순의 빈번한 강우로 인해 9월 중순으로 대체하였다. 기기 간 온도 및 습도의 현장실측 결과는 실측 직전 동일 환경조건 하에서 24시간 동안 측정된 자료를 비교하여, 수목피도 0% 지점의 설치기기를 기준으로 편차를 산출하여 보정하였다.

측정지점 주변에 분포하는 주요 표면재료별 알베도(albedo)와 표면온도를 측정하였다. 알베도는 Pyranometer(LI-COR LI-200SA)로 측정하였고, 이들 측정은 8월 중순 미기후 측정 시 오전 9시, 정오 및 오후 3시경

의 3회(매회 5반복)에 걸쳐 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 표면재료의 분포와 온도

측정지점별 수목피도는 0%, 8%, 24%, 44%, 79% 및 100%이었고, 수관체적은 피도가 낮은 지점부터 각각 2m³, 113m³, 259m³, 1,159m³, 1,897m³, 2,215m³인 것으로 나타났다. 표면재료의 구성비는 수목피도가 상대적으로 낮은 도심의 3개 지점에서 건물 24~53%, 아스팔트 포장 29~50%, 콘크리트블럭 포장 18~21%이었다(표 1). 수목피도가 비교적 높은 강원대학교 구내 3개 지점의 경우에는 잔디를 포함한 나지가 54~100%로 우점하였다.

측정지점별 표면재료의 평균 알베도는 밝은 화강석 벽면 0.35, 낡은 아스팔트 포장 0.15, 콘크리트블럭 포장 0.18, 나지 0.29 등이었다. 즉, 밝은 색 계통의 표면재료가 더 높은 알베도를 나타냈다. 표면온도는 하루 중 평균 아스팔트 포장 37℃, 콘크리트블럭 포장 36℃, 나지 29℃ 등으로서, 증발의 효과를 보유하며 알베도가 더 높은 나지가 아스팔트 또는 콘크리트 포장보다 7~8℃ 더 낮았다. 알베도가 낮은 무생물 표면재료는 저장열이 많아 결과적으로 현열 발생을 야기하고 주변의 대기온도를 상승시킨다.

2. 수목 식재량에 따른 온습도 변화

대기온도 및 습도의 측정 시 함께 측정한 주간 광도는 4,274lm이었다. 풍속은 최대 2.4m/s이며 평균 0.5m/s이었고, 풍향은 북서풍과 남서풍이 우세한 것으로 나

표 1. 측정지점별 수목피도와 표면재료 분포비

수목피도 (%)	수관체적 (m ³)	표면재료 분포비(%)				
		건물	아스팔트	콘크리트	잔디	나지
0	1.6	24.2	50.0	21.2	0.0	4.5
8	113.1	52.9	28.9	17.8	0.0	0.4
24	259.0	35.2	28.9	20.0	0.0	15.9
44	1,159.4	0.0	32.6	13.0	0.0	54.4
79	1,897.3	0.0	2.8	8.5	22.2	66.5
100	2,215.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0

타났다. 7월 하순, 8월 중순 및 9월 중순의 3회에 걸쳐 실측한 주간(오전 7시~오후 7시)의 평균 대기온도는 수목피도가 높을수록 낮았고, 피도 0%와 100% 지점 간의 온도차는 4.8℃이었다(표 2 및 그림 1). 즉, 대기온도는 수목피도 0%인 지점에 비해, 피도 8% 지점에서 0.6℃, 피도 24% 지점 1.3℃, 피도 44% 지점 2.4℃, 피도 79% 지점 3.5℃, 피도 100% 지점 4.8℃의 차이로 각각 낮아지는 현상을 보였다. 주간 최고온도는 수목피도 0%인 지점에서 평균 32.7℃, 피도 100% 지점 26.5℃로서, 피도 100%인 지점이 피도 0% 지점보다 6.2℃나 낮았다. 이 최고 온도차는 수목의 증산작용이 가장 활발한(조현길과 野島義照, 2000) 오후 2~3시에 나타났다.

반면, 주간 습도는 수목피도 0%인 지점에 비해, 피도 8%인 지점에서 1.0%, 피도 24% 지점 5.1%, 피도 44% 지점 9.3%, 피도 79% 지점 15.1%, 피도 100% 지점 21.0%의 차이로 각각 높아지는 경향을 보였다. 증산 과정에서 발생한 수증기는 현열을 잠열로 바꾸어 주변 온도를 낮추는데 기여한다. 주간 최고습도는 수목피도 0%인 지점에서 평균 79.5%, 피도 100% 지점 93.7%로서, 양 측정지점 간의 습도차는 14.2%이었다.

표 2. 수목피도에 따른 주간의 평균 대기온도 및 습도 차이*

수목피도 (%)	7월 하순		8월 중순		9월 중순		평균	
	온도	습도	온도	습도	온도	습도	온도	습도
0	32.1	53.2	28.4	40.1	23.2	45.0	27.9	46.1
8	31.5	53.6	27.9	43.0	22.4	44.7	27.3	47.1
24	30.9	57.7	27.2	46.0	21.6	50.0	26.6	51.2
44	29.7	59.9	25.9	50.7	20.8	55.7	25.5	55.4
79	28.6	62.2	24.9	59.4	19.8	61.9	24.4	61.2
100	27.3	71.2	23.4	62.8	18.5	67.3	23.1	67.1

*: 단위-온도: ℃, 습도: %

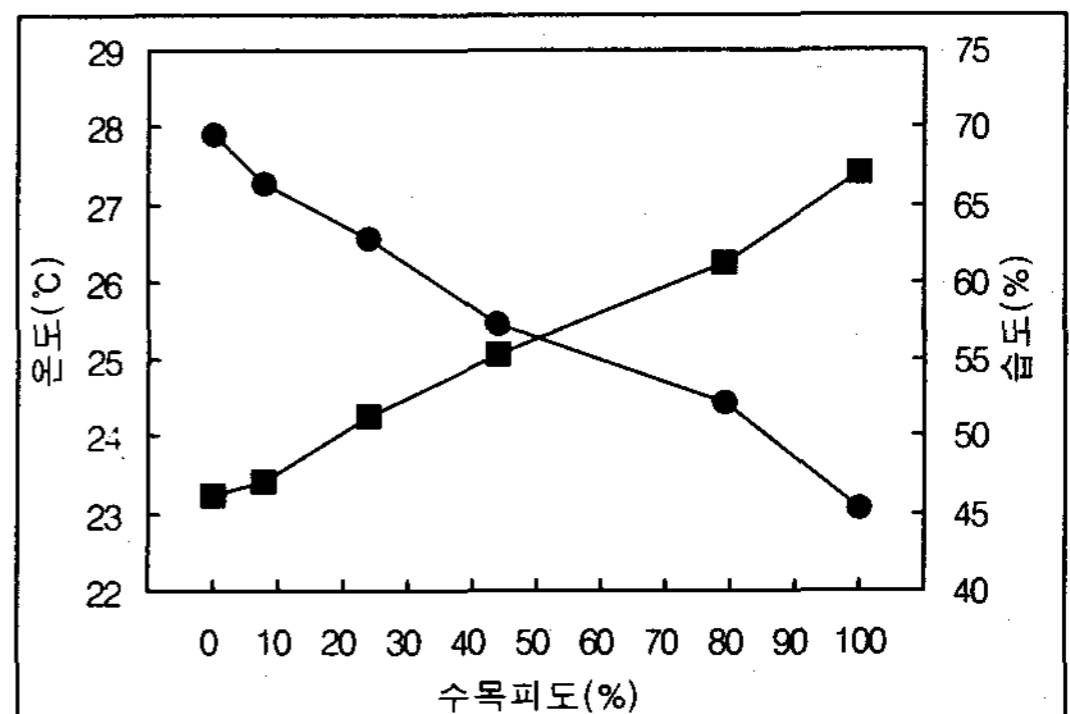


그림 1. 수목피도와 주간 대기 온습도의 상관
범례: ● 온도 ■ 습도

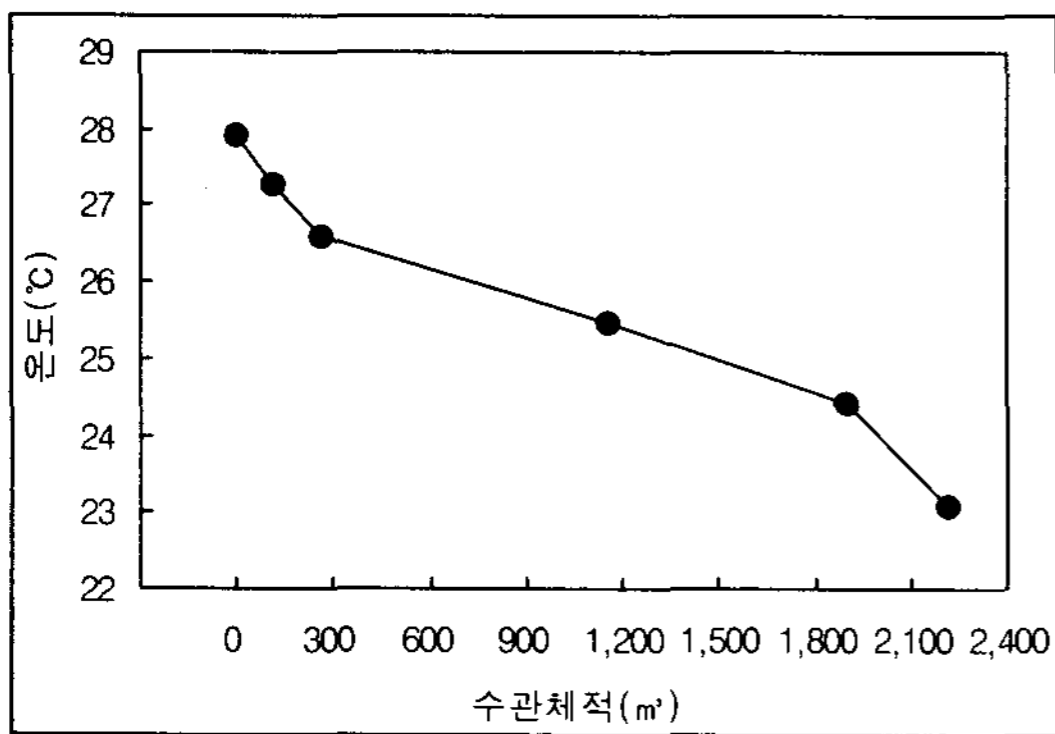


그림 2. 수관체적과 주간 대기온도의 상관

그림 2는 수관 체적에 따른 주간 대기온도의 상관을 보여준다. 기존의 연구들(Huang *et al.*, 1987; Profous, 1992; 조현길과 野島義照, 2000)은 수목피도라는 평면적 기준에서 온도 저감 효과와의 상관성을 제시하여 왔다. 수관 체적은 식재 수목 수관의 수직적 분포와 크기를 나타내는 입체적 변수로서, 수관의 증산에 따른 온도 저감 효과를 계량화하는 측면에서 평면적 변수인 수목피도보다 바람직한 지표이다. 이는 관목과 교목 간의 식재피도가 동일하다 해도 수관 체적에 따른 증산 효과는 상이하기 때문이다. 도시환경에서 흉고직경이 약 15cm인 느티나무나 단풍나무의 수관 체적은 약 35m³/주인데, 수관 체적 약 260m³ 지점의 주변 온도는 수관 체적 2m³인 지점에 비해 1.3°C 낮았다.

상기한 기존 연구들에 따르면, 수목피도 10% 증가는 여름철 또는 생장기간의 대기온도를 0.5~1°C 감소시켰다. 본 연구에서는 여름철 주간 온도가 수목피도 10% 증가에 따라 평균 약 0.55°C씩 낮아졌다. 이 결과에 비하면, 선행 연구는 더 큰 저감 효과의 범위를 제시하고 있지만 측정환경의 변이를 감안하면 유사한 것이라고 검증할 수 있겠다. 수목피도 증가에 따른 온도차는 피도 44% 이하에서 약 0.61°C씩, 그 이상의 피도에선 0.46°C씩 낮아졌다. 이는 녹지가 풍부한 교외보다 하드스케이프가 우점하는 도심에서 일정수준 이상의 수목 식재를 추진할 때 온도 저감 효과가 더 현저할 수 있음을 시사한다. 본 연구 결과를 바탕으로, 수목피도(X_1 : %)와 수관체적(X_2 : m³)을 독립변수로 수목식재량에

따른 여름철 저감온도 변화(Y : °C)를 추정하는 적합한 회귀식을 제시하면 아래와 같다.

$$\ln Y = 3.3233 - 0.0018X_1 \quad (r^2 = 0.99, p < 0.0001) \quad (\text{식 1})$$

$$Y = 27.5297 - 0.0019X_2 \quad (r^2 = 0.96, p = 0.0007) \quad (\text{식 2})$$

도시수목의 증발산 및 차양을 통한 온도 1°C 저감은 주택 냉방에너지를 연간 호당 약 9% 절약하였고, 2°C 저감의 에너지 절약 효과는 약 2배 더 큰 것으로 나타났다(조현길과 안태원, 1999). 수목피도 10% 증가는 주택 냉방 에너지를 미국 Phoenix시에서 연간 12%, Sacramento시에서 24% 절약하였다(Huang *et al.*, 1992). 본 연구 결과는 에너지 수지 및 냉방 에너지 절약에 기여하는 도시녹지의 효과를 계량화하는데 유용한 기초정보가 될 것으로 기대한다.

인용문헌

1. 박인환, 장갑수, 김종용(2000) 대도시에서 냉방의 유형별 온도완화 효과: 대구광역시의 사례 연구. 한국조경학회지 78: 11-18.
2. 조현길, 안태원(1999) 춘천시 주거지구내 수목피도의 차이가 난방에너지 이용 및 비용에 미치는 효과. 한국조경학회지 27(2): 19-28.
3. 조현길, 野島義照(2000) 도시녹지의 미기후개선, CO₂ 흡수 및 화재방지의 효과. 한국자원식물학회지 13(3): 162-170.
4. Akbari, H., P. Martine, and A. Rosenfeld(1992) Using light-colored surfaces to cool our communities. In H. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, and S. Winnett, eds., *Cooling Our Communities*. Washington, DC: US Government Printing Office. pp. 43-52.
5. Douglas, I.(1983) *The Urban Environment*. London: Edward Arnold.
6. 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.
7. 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, DC: US Government Printing Office. pp. 27-42.
8. Profous, G.V.(1992) Trees and urban forestry in Beijing, China. *Journal of Arboriculture* 18: 145-153.
9. Wong, N. H., Y. Chen, C. L. Ong, and A. Sia(2003) Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* 38: 261-270.