

열쾌적성에 대한 가로수 수직적 구조의 영향 분석*

이수빈¹⁾ · 최혜영^{2),3)} · 조현길⁴⁾ · 윤영조⁴⁾ · 길승호⁴⁾

¹⁾ 강원대학교 조경학과 학생 · ²⁾ 서울대학교 농림생물자원학부 교수 ·

³⁾ 서울대학교 농업생명과학연구원 겸무연구원 · ⁴⁾ 강원대학교 생태조경디자인학과 교수

The Effects of Street Tree's Vertical Structures on Thermal Comfort*

Lee, Su-Been¹⁾ · Choe, Hye-Yeong^{2),3)} · Jo, Hyun-Kil⁴⁾ · Yun, Young-Jo⁴⁾ and Kil, Sung-Ho⁴⁾

¹⁾ Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University, Student,

²⁾ Dept. of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Professor,

³⁾ Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Adjunct Researcher,

⁴⁾ Dept. of Ecological Landscape Architecture Design, Kangwon National University, Professor.

ABSTRACT

Urban green spaces offer a variety of benefits to living things and humans. However, existing green spaces have been reduced and fragmented due to urbanization, and there is a limit to creating new large green spaces in densely developed cities. Street trees have fewer restrictions on land use, which can be a measure to secure green areas in cities. In Korea, excessive pruning is being done on some street trees for reasons such as blocking of building signboards, contact with electric wires, and restrictions on sidewalk widths. Therefore, it is necessary to quantitatively understand the relationship between the benefits provided by street trees and their structures to come up with an efficient and systematic planning and management plan for urban street trees. In this study, we quantitatively analyzed the relationship between the thermal comfort improvement by the shades of street trees and

* 본 연구는 2020년도 한국환경복원기술학회 추계학술대회에서 발표한 '온열쾌적성에 대한 가로수 수직적 구조의 영향 분석(지상라이다를 이용하여)'을 발전시킨 것으로, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NO. 2019R1G1A1005770)과 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 '(2019151D10-2123-0301)'의 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

First author : Lee, Su-Been, Dept. Landscape Architecture, Kangwon National University, Student,
Tel : +82-33-250-8340, Email : sblee625@kangwon.ac.kr

Corresponding author : Choe, Hye-Yeong, Dept. of Agriculture, Forestry and Bioresources / Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Professor,
Tel : +82-2-880-4756, Email : hy.choe@snu.ac.kr

Received : 6 May, 2021. **Revised** : 13 August, 2021. **Accepted** : 12 August, 2021.

the vertical structure, planting environment, and types of street trees. To calculate the thermal comfort felt by human body, we calculated UTCI (Universal Thermal Climate Index) of each street tree. For the vertical structure of street trees, we used Terrestrial LiDAR and the point clouds of street tree's crown was sliced vertically at 1m intervals. We conducted a multiple regression analysis on the thermal comfort improvement using the variables we obtained from fields. As a result, in the case of a street tree's vertical structure, the larger the volume of tree's crown located 3-4m ($\beta=0.298$, $p<.05$) and 6-7m ($\beta=0.568$, $p<.001$) above clear length, the better the cooling effect. In addition, the thermal comfort improvement was assessed to decrease as the DBH increased ($\beta=-0.435$, $p<.001$). In general, the crown diameter and DBH are positively correlated, with a cooling effect occurring as crown diameter increases. In this study, the opposite result was obtained due to the small number of trees measured, so additional research is needed by increasing the number of tree samples. In the case of the planting environment, the effect of improving thermal comfort was higher in the shaded area of trees planted to the south ($\beta=-0.541$, $p<.001$). Since unsystematic management of street trees can deteriorate the function of them, quantitative evaluations of the vertical structure of street trees are required, which can provide specific measures for planning and management of urban street trees with thermal comfort effect.

Key Words : *Urban trees, UTCI, Cooling effect, Terrestrial LiDAR, Tree management*

I. 서론

도시 녹지는 공기 여과, 오염물질 제거, 생물 다양성 보전, 경관미 개선, 공중 보건 증진 등의 기능을 통해 도시와 생물, 인간에게 다양한 편익을 제공한다(Choe and Thorne, 2019; Thorne et al. 2020; Tzoulas et al. 2007; Wolch et al. 2014). 특히 여름철에 도시 녹지는 태양복사를 차단하여 그늘을 제공하고 증발산 기능을 통해 주변 공간을 냉각시켜 열 환경에 대한 스트레스를 감소시킨다(Qiu et al. 2017; Shashua-Bar and Hoffman, 2000; Yun et al. 2020). 이러한 도시 녹지가 제공하는 다양한 편익은 기존의 도시 녹지공간을 연결하고 새로운 녹지공간을 조성함으로써 유지 및 향상시킬 수 있다(Jim and Chen, 2003). 그러나 도시화로 인해 도시 녹지공간은 점점 감소하여 파편화가 진행되고 있으며, 이미 고밀도로 개발이 진행된 도시에 넓은 녹지공간

을 조성하는 것은 한계가 있다(Byomkesh et al. 2012; Haaland and Bosch, 2015; Kim et al. 2017).

도시의 가로수는 가로경관을 형성하는 녹지 요소 중 하나이며, 공원, 산림 등의 도시 녹지 요소와 비교하여 토지이용 측면에서 제한이 적기 때문에 도시에서 녹지를 확보할 수 있는 하나의 기회요소가 될 수 있다(Kwon et al. 2019; Salmond et al. 2016; Wood and Esaian, 2020). 가로수는 선적인 형태의 녹지로 기타 도시 녹지를 연결하는 역할을 수행하며, 생물종에게 서식지 및 먹이를 제공하여 도시 생물다양성 보전에 기여하는 등 도시와 생물에게 다양한 편익을 제공할 수 있다(Byun and Kim, 2010; Wood and Esaian, 2020). 가로수가 제공하는 편익 중에서 여름철 열 환경 개선에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔으며, 특히 여름철 가로수의 그늘 제공 및 증발산 기능에 의한 인간의 열 스트레스 개선

효과와 도시열섬현상 저감 분석 등의 연구가 다양하게 이루어졌다(Gillner et al. 2015; Li and Ratti, 2018; Park CY et al. 2018; Pretzsch et al. 2015; Shashua-Bar and Hoffman, 2000). Coutts et al. (2016)은 도시 가로 형태(깊고 얇음)와 수목의 수관 밀도(높고 낮음)의 차이가 나타나는 3곳의 거리를 대상으로 UTCI(Universal Thermal Climate Index)를 산출하여 가로수 녹음에 의한 인간의 열 스트레스 개선 효과를 연구하였으며, 열 스트레스 개선 효과는 거리의 형태와 환경에 따라 지역적으로 변화하고, 열 스트레스를 효과적으로 개선하기 위해서는 수목의 배치 방식, 식재 밀도, 수종 선정 등을 고려할 필요성이 있음을 확인하였다. 또한 수목의 수직적 구조에 따라 가로수가 제공하는 편익의 변화 정도를 파악한 연구로 Abreu-Harbach et al. (2015)은 가로수의 수고, 수관의 크기 및 모양 등이 수관 하부의 태양복사 투과율과 음영 정도에 영향을 미치며 결과적으로 인간의 열 스트레스 개선 정도에 영향을 미치는 요인임을 확인하였다.

선행 연구를 통해 여름철 열 환경 개선에 대한 수목의 식재 환경과 수직적 구조의 영향을 확인하였으나, 기존 연구의 수목 관측은 대부분 실측 또는 항공영상과 위성영상 등을 활용하여 진행되었기 때문에 측정 데이터의 형태는 2차원적으로 획득되어 수직적 구조에 대한 정량적인 분석에 한계가 존재할 수 있다(Li and Ratti, 2018). 따라서 본 연구에서는 지상라이더(Terrestrial LiDAR; Terrestrial Light Detection and Ranging)를 이용하여 가로수의 수직적 구조에 대한 정량적 분석을 시도하였다. 지상라이더는 능동형 원격탐사 시스템으로 레이저 스캐너를 통해 방출된 레이저 펄스(pulse)가 물체에 도달한 후 반사되어 되돌아오는 시간을 계산함으로써 물체의 3차원적 위치 정보를 출력한다(Park and Lee, 2007). 취득한 데이터는 점군(Point Cloud)으로 표현되고 포인트 클라우드 데이터를 통해 물체의 3차원적 구조에 대한 정밀한 정보 취득이 가능하다

는 장점이 있다(Malhi et al. 2018). 산림분야에서 지상라이더는 과거 수동으로 산림 인벤토리를 측정하는 방식에서 작업의 효율성을 개선하기 위해 이용되었으며, 단일 수목의 위치, 줄기 및 수관 구조, 수종, 수고, 흉고직경 등 수목의 세부적인 인벤토리를 수집하는데 이용할 수 있다(Liang et al. 2016; Yan et al. 2019).

본 연구에서는 가로수의 수직적 구조를 정량적으로 분석하며, 이를 바탕으로 가로수가 제공하는 열쾌적성 개선 효과에 대한 상관성을 평가하고자 한다. 이를 통해 열쾌적성 측면에서 도시 가로수의 계획과 관리를 위한 효율적이고 체계적인 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

II. 연구방법

본 연구는 강원도 춘천시 강원대학교 내 식재된 수목 중 가로 주변에 위치한 수목 32그룹을 대상으로 하였으며(Figure 1; Appendix 참고), 가로수 녹음에 의한 열쾌적성 개선 효과와 가로수의 수직적 구조 및 식재된 환경, 침엽수 또는 활엽수로 구분한 수목 유형의 상관관계를 평가하였다. 대상 가로수는 수고가 6m 이상이고 수관폭 및 수관 높이가 4m 이상인 수목을 대상으로 하였으며, 기후요소 측정 시간대인 12시에서 3시 사이에 주변 건물 또는 시설물 그림자의 영향이 적은 수목을 선정하였다. 상관관계 평가를 위해서 가로수에 의한 열쾌적성 개선 효과는 수목별로 음영영역과 비음영영역의 미기후 차이를 측정하여 열쾌적성 지수 중 하나인 UTCI를 산정하였으며, 가로수 및 식재 환경 등에 대한 정보는 지상라이더, 기상측정기기를 활용한 현장 조사와 지형 분석을 진행하였다.

1. Universal Thermal Climate Index(UTCI) 산출

열 환경에 대한 열쾌적성 평가는 PET (Physiological Equivalent Temperature), UTCI (Universal Thermal Climate Index), WBGT(Wet

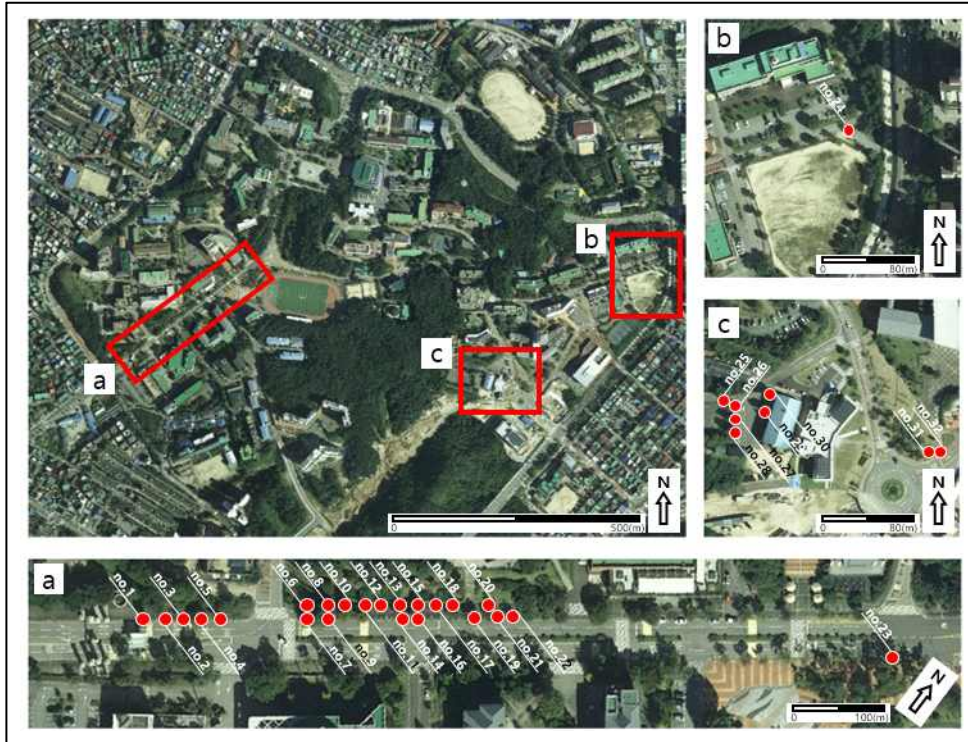


Figure 1. Study site and the number of trees specified in the appendix

Bulb Globe Temperature), WCT(Wind Chilly Temperature) 등 다양한 지수를 이용하여 계산할 수 있다(Blazejczyk et al. 2013; Park et al. 2014). 그 중 본 연구에서 이용한 UTCI는 기후 조건에 의해 변화하는 인체의 생리적 반응에 기반하며 (Fiala et al. 2012), 인체의 대사율 및 의복수준 등을 고려한 의류효과 매커니즘이 반영되어 (Havenith et al. 2012), 실외에서 인체가 체감하는 열쾌적성 평가에 유용하다고 평가되고 있다(Park et al. 2014). UTCI는 기온, 평균복사온도, 지면으로부터 10m 높이의 풍속, 상대습도 입력변수에 의해 산출되며, UTCI 산출 모델의 기준 조건인 기온과 실제 산출 값에서 발생하는 편차는 기온, 평균복사온도, 지면으로부터 10m 높이의 풍속, 상대습도의 실제 측정값에 의해 나타난다(식 1; Blazejczyk et al. 2013). 본 연구에서는 R(v.3.6.2)의 rBiometeo 패키지에서 *utci* 함수를 이용하여 계산하였다.

UTCI 산출을 위한 평균복사온도는 자연대류 조건에서 흑구온도와 기온에 기반한 ISO 7726 (1998) 식에 따라 산출하였으며(식2), 산출에 필요한 기온, 흑구온도, 상대습도, 풍속 변수는 가로수에 의한 열쾌적성 개선 효과를 뚜렷이 파악하기 위해 여름철(7~8월, 우천시 제외) 12~15시 사이에 측정하였다. 기온, 상대습도, 흑구온도 변수는 구의 지름이 0.05(m), 구의 방사율이 95(%)인 흑구온도계(TENMARS사의 TM-188D)를 이용하여 측정하였다. 또한 풍속 변수는 휴대용 풍속계(TSI사의 9545)를 이용하여 측정하였으며, 풍속 값을 10m 높이로 변환하기 위해 풍속 변화 공식을 이용하였다(식 3; Brode et al. 2012). 측정은 지면으로부터 1.2m 높에서 진행하였으며, 이용한 흑구온도계는 주변 환경과 흑구의 평형상태 도달을 위해 측정 위치마다 5분 이상 정치시킨 후 측정하였다(Kantor and Unger, 2011; Thorsson et al. 2007). 비음영영역과 가로수에 의해 생성된

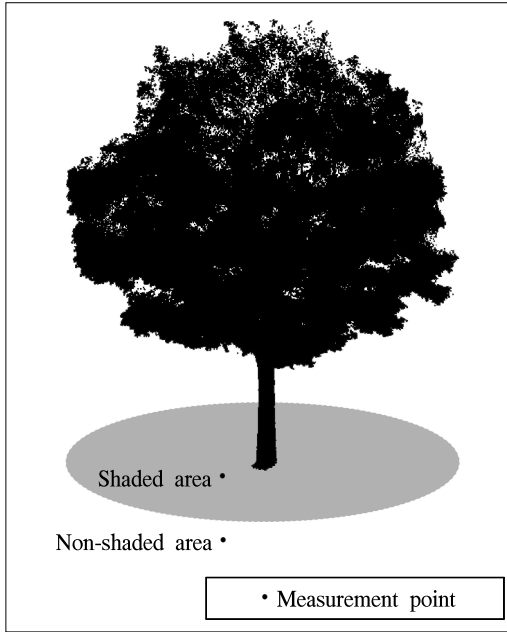


Figure 2. Measurement points of air temperature, globe temperature, relative humidity, wind speed at shaded area and non-shaded area

음영영역의 비교를 위해 각 영역에서 3회 측정하여 평균하였으며(Figure 2), 비음영영역 측정의 경우 해당 가로수 음영영역의 가장자리로부터 약 15~20cm 떨어진 위치에서 측정하였다. Blazejczyk et al. (2013)에 의한 UTCI 평가척도는 10단계로 구분되며, UTCI 값이 +32℃ 이상일 경우 강한 열 스트레스를 말한다(Table 1).

$$UTCI = f(T_a; T_{mrt}; va; RH) \quad (식 1)$$

$$= T_a + Offset(T_a; T_{mrt}; va; RH)$$

T_a = 기온(Air temperature; ℃)

T_{mrt} = 평균복사온도(Mean radiant temperautre; ℃)

va = 지면으로부터 10m 높이의 풍속(Wind speed; m/s)

RH = 상대습도(Relative humidity; %)

$$T_{mrt} = [(T_g + 273.15)^4 + \frac{(0.25 \times 10^8)}{\epsilon_g} (\frac{|T_g - T_a|}{D})^{\frac{1}{4}} \times (T_g - T_a)]^{\frac{1}{4}} - 273.15 \quad (식 2)$$

T_{mrt} = 평균복사온도(Mean radiant temperature; ℃)

T_g = 흑구온도(Globe temperature; ℃)

T_a = 기온(Air temperature; ℃)

ϵ_g = 구의 방사율(Globe's emissivity)

D = 구의 지름(Globe's diameter; m)

$$va = va_{xm} \times \frac{\log(10/0.01)}{\log(x/0.01)} \quad (식 3)$$

va = 지면으로부터 10m 높이의 풍속(m/s)

va_{xm} = 측정된 풍속(m/s)

x = 측정 높이(m)

Table 1. The assessment scale of the UTCI (Blazejczyk et al. 2013)

UTCI(℃) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

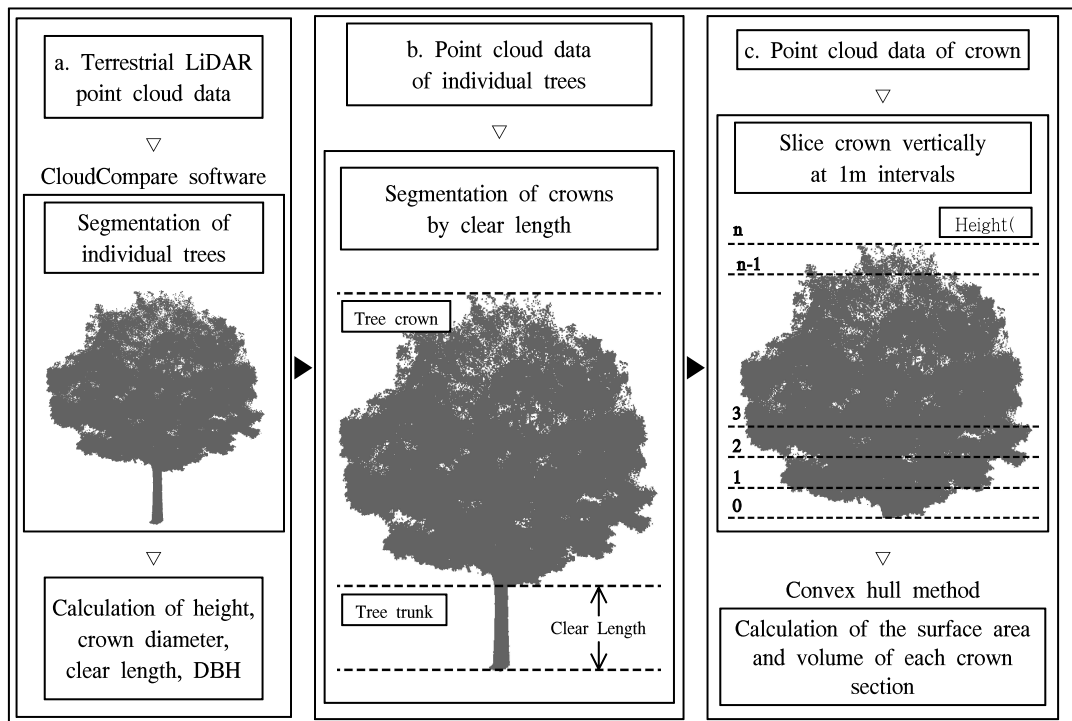
2. 가로수 및 식재 환경 등 데이터 구축

1) 가로수의 수직적 구조

가로수 수직적 구조에 대한 정보를 취득하기 위해 지상으로부터 1.5m 높이에서 지상라이다(Leica사의 BLK360; Table 2)를 이용하여 가로수 32그룹에 대한 포인트 클라우드 데이터를 수집하였다. 수집한 포인트 클라우드 데이터는 CloudCompare(v2.11.2) 소프트웨어를 이용하여 분석하였으며, segmentation 툴을 활용하여 단일 수목으로 수동 분리한 후 각 수목의 수고(tree

Table 2. Equipment specification of Terrestrial LiDAR(Leica BLK360)

Indicator	value
Scanning distance	min. 0.6-up to 60m
Field of view(horizontal)	360°
Field of view(vertical)	300°
Ranging accuracy	±4mm accuracy of measurement at a scanning distance of 10m/ ±7mm accuracy of measurement at a scanning distance of 20m
Point measurement rate	360,000 points/s

**Figure 3.** The process of analyzing vertical structure of street tree using Terrestrial LiDAR

height), 수관폭(crown diameter), 지하고(clear length), 흉고직경(DBH)을 파악하였다(Figure 3a). 수고는 가장 하단에 위치한 포인트로부터 최상단에 위치한 포인트의 길이를 측정하였다. 수관폭은 수관 좌우의 직경을 수직의 서로 다른 방향에서 2회 측정하여 평균하였다. 지하고는 수관의 잎과 가지가 존재하지 않는 수간 길이를 측정하였다. 흉고직경은 지면으로부터 1.2m 높이에 위치한 줄기의 좌우 직경을 수직의 서로 다른 방향에서 2회 측정하여 평균하였다.

이후 수관 데이터를 추출하기 위해 수목별 지하고 높이를 기준으로 하여 상층에 위치한 포인

트 클라우드 데이터를 분리하였으며(Figure 3b), 이후 수관 데이터를 하부에서부터 1m씩 나누어 분석단위를 설정하고 각 층에 해당하는 수관의 면적과 체적을 산출하였다(Figure 3c). 수관의 면적과 체적은 각 층에 해당하는 포인트 클라우드 데이터로 볼록껍질(convex hull) 보간 방법을 적용하여 산출하였으며, CloudCompare 소프트웨어의 2.5D volume 툴을 이용하였다. 볼록껍질 보간은 가장 바깥에 위치한 포인트 클라우드 데이터를 직선으로 연결하고, 이를 그리드에 투영한 후 각 셀의 값을 합산한다(Yan et al. 2019). 각 수관 층의 평가를 위해 그리드 셀의 단위를

Table 3. Description of dependent variable(Y) and independent variables(X) for thermal comfort effect analysis of street tree

Variable		Description(unit)			
Dependent variable(Y)		Differences in UTCI for shaded and non-shaded areas of every tree(°C)			
Independent variables(X)		Description(unit)	Range		
Tree type		A Coniferous or Broadleaf tree(-)	-		
Environmental variables	Land cover	The Surface components at planting ground(-)	-		
	Aspect	The aspect at planting ground(°)	156.5-268.2		
	Slope	The gradient at planting ground(°)	2.8-7.4		
3D vertical structural variables of street trees	Tree height		The vertical distance between ground and tree top(m)	6.3-11.0	
	Crown diameter		The average horizontal width of the crown(m)	4.5-9.8	
	Clear length		The tree trunk length without leaves and branches(m)	1.7-3.2	
	DBH		The diameter of the trunk at breast height(cm)	17-56	
	Crown surface area	0-1m		The surface area of the crown slice calculated by convex hull(m ²)	0-72.4
		1-2m			
		2-3m			
		3-4m			
		4-5m			
		5-6m			
		6-7m			
		7-8m			
	Crown volume	0-1m		The volume of the crown slice calculated by convex hull(m ³)	0-41.7
		1-2m			
		2-3m			
3-4m					
4-5m					
5-6m					
6-7m					
7-8m					
8-9m					

Table 4. UTCI difference between shaded and non-shaded area and the result of a t-test

	UTCI(°C)		t(p)
	Shaded area by tree	Non-shaded area	
Mean	30.52	34.14	17.439(0.000)***
Median	30.49	34.15	
SD	0.87	1.19	
Minimum	28.30	31.34	
Maximum	31.95	35.65	

*** $p < .001$

(N = 32)

1×1(cm)로 설정하였으며, 셀의 높이(z) 값은 각 셀에 위치한 포인트 데이터의 z 평균값을 이용하였다. 지상라이다를 이용한 가로수의 수직적 구조 자료 구축 과정은 Figure 3에 정리하였다.

2) 가로수 식재 지점의 환경 및 수목 유형

열쾌적성 개선 효과에 대한 가로수 식재 지점의 환경 및 수목 유형의 영향을 분석하기 위해 가로수 식재 지점의 경사(slope), 방향(aspect), 토지피복(land cover) 자료와 침엽수 또는 활엽수로 구분한 수목 유형의 자료를 구축하였다. 가로수 식재 지점에 대한 경사 및 방향 분석은 연구 대상지의 DEM 자료를 활용하여 ArcGIS (v10.3.1) 소프트웨어로 지형 분석을 수행하였으며, 토지피복과 수목 유형 데이터는 현장 조사를 통해 구축하였다.

각 가로수의 식재 지점에 대해 지형 분석을 수행한 경사 데이터는 2.8-7.4(°)의 범위를 입력하였으며, 방향 데이터는 북(North; 0°; 360°)을 기준으로 156.5-268.2(°; Southeast-West)의 범위를 입력하였다. 토지피복 데이터는 가로수 식재 지점 지표면에 존재하는 구성물질을 보도블록 또는 초지의 범주로 구분하였으며, 수목 유형 데이터는 침엽수 또는 활엽수의 범주로 구분하였다.

3. 열쾌적성에 대한 가로수의 영향 분석

가로수 녹음에 의한 열쾌적성 개선 효과에 가로수의 수직적 구조와 식재 지점의 환경 상황, 수목 유형이 미치는 영향을 분석하기 위해 열쾌적성 개선 효과를 다중 회귀하여 추정하였으며, 이는 R(v.3.6.2) 소프트웨어의 car 패키지를 이용하였다. 각 수목별 비음영영역과 음영영역의 UTCI 평가값을 이용하여 음영영역에 대한 UTCI 개선 정도를 종속변수(Y)로 설정하였으며, 구축한 가로수의 수직적 구조 및 식재 지점의 환경 상황, 침엽수 또는 활엽수로 구분한 수목 유형의 데이터를 독립변수(X)로 설정하였다

(Table 3). 모든 독립변수에 대해 다중공선성을 확인하여 변수 간 상관성이 높은 변수를 제거하였으며, 선택된 변수는 가로수 수직적 구조 데이터의 수고(tree height), 지하고(clear length), 흉고 직경(DBH), 수관 체적(crown volume) 0-1m, 수관 체적 3-4m, 수관 체적 6-7m, 수관 체적 8-9m 변수와 환경 변수의 경사(slope), 방향(aspect), 토지피복(land cover) 및 수목 유형(tree type)이다. 선택된 독립변수를 대상으로 stepwise 방법을 통해 최종적으로 방향, 흉고직경, 수관 체적 3-4m, 수관 체적 6-7m 변수가 선택되었으며, 열쾌적성 개선 효과의 최적 모델을 도출하기 위해 최종 변수에 대해 2차적으로 다중 회귀를 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. Universal Thermal Climate Index(UTCI) 평가

가로수 32그룹에 대한 UTCI(°C)를 산출한 결과 비음영영역의 평균 UTCI는 34.14이며, 표준편차는 1.19이다. 가로수에 의해 생성된 음영영역의 평균 UTCI는 30.52이며, 표준편차는 0.87이다. UTCI 평가척도(Table 1)에 따라 비음영영역과 음영영역의 차이를 분석한 결과, 비음영영역의 평균 UTCI 평가척도는 strong heat stress로 나타났으며, 음영영역의 평균 UTCI 평가척도는 moderate heat stress로 나타났다.

가로수 녹음 유무에 따른 UTCI 평가 결과의 차이를 알아보려고 대응표본 t-검정을 실시하였다. 그 결과 t 값은 17.439이며, p 값은 0.000($p < .001$)으로 통계적으로 유의하게 나타났다(Table 4). 비음영영역과 음영영역의 평균 UTCI를 비교한 결과 비음영영역의 UTCI가 약 3.6 2°C 높게 나타났다. 즉 여름철 가로수의 녹음은 UTCI를 감소시켜 인간의 열 스트레스 정도를 strong heat stress(UTCI>32°C)에서 moderate heat stress(UTCI>26°C)로 낮추었으며, 평균 0.9 단계가 저감되어 열쾌적성 개선 효과가 나타나는 것으로 평가되었다.

본 연구 결과의 UTCI는 가로 차양에 의한 열쾌적성 효과를 분석한 Ryu et al. (2018)의 연구 결과에서 가로수에 의한 평균 UTCI 저감 효과 2.9~4.6°C와 비교할 때 큰 차이를 보이지 않으나, 제주와 서귀포의 가로수를 대상으로 열쾌적성 효과를 분석한 Jo et al. (2017)의 연구 결과 평균 UTCI 저감 효과 5.0~8.5°C보다 낮게 나타나 다소 차이를 보였다. 이는 기후요소의 측정 방법, 측정 위치 및 시간대, 평균복사온도 산정 방식에 따라 UTCI 평가 결과에서 차이를 보이는 것으로 판단된다(Jo et al. 2017).

2. 열쾌적성에 대한 가로수의 영향 분석

최종 독립변수를 대상으로 실시한 다중회귀분석 결과, 회귀모형은 통계적으로 유의하게 나타났으며($F=10.19, p<.001$), 회귀모형의 설명력은 약 61.9%로 나타났다($R^2=.619, \text{adj}R^2=.559$). Durbin-Watson 통계량은 2.199로 2에 근사한 값을 나타내 잔차의 독립성에 문제가 없는 것으로 판단되며, 분산팽창지수(VIF)는 모든 변수에서 10 미만으로 나타나 다중공선성의 문제가 없는 것으로 판단된다. 회귀계수의 유의성 검증 결과, 방향($\beta=-0.541, p<.001$), 흉고직경($\beta=-0.435, p<.01$)은 열쾌적성 개선 효과에 유의한 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 수관 체적 3-4m($\beta=0.298, p<.05$), 수관 체적 6-7m($\beta=0.568, p<.001$)은 열쾌적성 개선 효과에 유의한 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

서향에 식재된 수목일수록 열쾌적성 개선 효과가 비교적 작게 나타났으며, 남향에 식재된 수목일수록 열쾌적성 개선 효과가 크게 나타난 것으로 평가되었다. 이는 태양이 동-서향으로 이동함에 따라 서향에 식재된 수목이 일사에 장시간 노출되어 열에너지가 축적되었기 때문에 비음영영역에서 축적된 열에너지가 수목에 의해 생성된 음영영역까지 영향을 미쳐 열쾌적성 개선 효과가 비교적 작게 나타난 것으로 판단된다(Ryu and Lee, 2018; Sanusi et al. 2016).

가로수 수직적 구조의 경우, 수목의 흉고직경이 증가할수록 열쾌적성 개선 효과는 작게 나타났다. 기존 연구 결과에 따르면 일반적으로 수목의 흉고직경과 수관폭은 양의 상관관계를 가지며(Troxel et al. 2013), 수관폭의 크기는 열쾌적성 개선 효과에 영향을 미치는 요인 중 하나로 수관폭이 커지면 음영영역의 면적이 넓어지고 주변 공간을 냉각시키는 냉각효과(cooling effect)의 정도가 커지기 때문에 열쾌적성 개선 효과는 증가할 수 있다(Zhang and Gou, 2021). 그러나 본 연구 결과에서 흉고직경이 증가할수록 열쾌적성 개선 효과가 작게 나타난 이유는 조사한 표본 가로수의 수관폭과 흉고직경의 관계에서 일반적인 양의 상관관계가 나타나지 않았으며, 한정된 표본 수로 인해 나타난 결과라고 판단된다. 향후 수목의 표본 수를 증가시켜 다양한 자료를 구축한다면 흉고직경과 수관폭에서 일반적인 관계가 나타날 수 있을 것이라 판단된다.

또한 3-4m, 6-7m 높이에 위치한 수관의 체적이 증가할수록 열쾌적성 개선 효과가 높아지는 것으로 평가되었다. 조사한 수목 32그룹에 대해서 3-4m 높이에 위치한 수관 층은 다른 층에 비해 면적과 체적이 큰 경향을 보였다. 수목에 의해 생성된 음영영역의 크기는 열쾌적성 효과에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나로(Abreu-Harbich et al. 2015), 3-4m 높이에 위치한 수관 체적의 증가는 수목에 의해 생성되는 음영영역의 크기를 증가시켜 열쾌적성 효과가 나타난 것으로 판단된다. 또한 수관의 6-7m 높이에 위치한 층은 수목의 상층부에 해당하며, 수관 상층부의 체적이 증가할수록 비슷한 수관폭을 가지는 키가 작은 수목에 비해 상대적으로 수관 체적과 잎의 밀도가 높아져 수목 하부의 음영이 짙어지고 태양복사의 차단 및 흡수량이 증가되어 열쾌적성 효과가 나타난 것으로 판단된다(Abreu-Harbich et al. 2015; Coutts et al. 2016).

열쾌적성 개선 효과에 대해 다중 회귀한 결과

Table 5. Multiple regression analysis results on thermal comfort improvement effect

variable	B	SE	β	t	p	VIF
(Intercept)	8.883	1.183	-	7.508***	<.001	-
Aspect	-0.211	0.005	-0.541	-3.966***	<.001	1.225
DBH	-0.054	0.016	-0.435	-3.454**	.002	1.044
Crown volume 3-4m	0.040	0.018	0.298	0.035*	.035	1.178
Crown volume 6-7m	0.248	0.061	0.568	4.033***	<.001	1.303

$$F=10.19(p<.001), R^2=.619, \text{adj}R^2=.559, D-W=2.199$$

* $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$

도출된 독립변수들이 통계적으로 유의하게 평가되었지만 결정계수(R^2)가 약 0.619($\text{adj}R^2=0.559$)로 나타나 열쾌적성 개선 효과에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 나타났다. 본 연구는 열쾌적성 개선 효과에 대한 가로수의 수직적 구조의 영향을 파악하기 위한 파일릿 스티디로써 열 환경에 미치는 다양한 요인들을 일부 환경 요인으로 제한한 한계가 있으나, 수종, 수목 잎의 크기 및 방향, 증발산 속도, 주변에 위치한 건물의 높이, 거리의 폭과 방향, 바람의 이동 등 다양한 요인들이 복합적으로 작용하여 열쾌적성에 영향을 미치기 때문에 (Sanusi et al. 2016), 향후 연구 설계에 있어 다양한 환경 요인들을 포괄할 수 있도록 보완하는 과정이 필요하다.

IV. 결 론

본 연구는 여름철 가로수에 의해 개선되는 인체의 열쾌적성 개선 효과와 가로수의 수직적 구조 및 가로수가 식재된 환경, 침엽수 또는 활엽수로 구분한 수목 유형의 관계를 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 인체가 체감하는 열쾌적성을 산출할 수 있는 지수 중 하나인 UTCI를 활용하였으며, 지상라이다 등을 이용한 현장 조사와 지형 분석을 통해 가로수 및 식재 환경 등의 데이터를 구축하였다.

가로수 녹음으로 인한 열쾌적성 개선 효과를 분석한 결과 비음영영역과 비교하여 가로수의 음영영역에서 열스트레스가 약 3.62℃ 개선된

것으로 평가되었으며, 인간이 비음영영역에서 느낄 수 있는 강한 열 스트레스는 가로수 녹음에 의해 보통 열 스트레스로 완화된 것을 확인할 수 있었다. 또한 열쾌적성 개선 효과는 가로수 식재 지점의 방향과 흉고직경의 크기, 수관 체적에 따라 정도에 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

우리나라에서는 가로수 수관에 의한 상가의 간판 가림, 가로수 식재 계획 시 수목의 생장 높이를 고려하지 않아 발생하는 전선과의 접촉, 보도폭의 제한 등의 이유로 일부 가로수에서 과도한 전정이 진행되고 있으며, 미흡하고 체계화되지 않은 계획과 관리로 인해 가로수의 기능이 저하되고 있다(Han et al. 2013). 이에 가로수가 제공하는 편익과 가로수 구조의 관계를 정량적으로 분석할 필요가 있다고 판단하였으며, 본 연구에서는 열쾌적성 측면에 초점을 맞추어 가로수 수직적 구조에 대한 체계적인 관리의 필요성을 제안하고자 가로수의 수관 구조를 1m씩 나누어 세분화를 시도하였다.

본 연구의 대상지는 데이터 구축의 편의를 위해 대학교 캠퍼스에서 조사를 진행하여 다른 지역의 가로수에서 나타나는 결과와 차이가 나타날 수 있다. 도시의 경우 교외나 농촌에 비해 건물, 포장로 등이 우점하고 인구가 밀집하여 상대적으로 축적되는 열의 양이 많아 열 스트레스가 높게 나타날 수 있으며, 하천의 유무 등의 지역적인 공간 특성과 토지이용 현황 등의 세부적인 공간 특성에 의해 개선되는 열스트레스 정도

는 변화할 수 있다(Jo et al. 2009; Oh et al. 2005; Park et al. 2016). 또한 가로수의 수종, 배치 방식 등에 따라 열스트레스 개선 정도에 차이가 나타날 수 있으나(Jo et al. 2017; Ryu et al. 2018), 본 연구의 결과를 통해 여름철 가로수의 녹음은 인간의 열쾌적성 개선에 효과가 있으며, 일부 높이의 가로수 수관 체적 감소는 열쾌적성 개선 효과에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타나 열쾌적성 측면에서 효율적인 도시 가로수 계획과 관리를 위해서는 가로수의 수직적 구조를 고려할 필요가 있음을 확인하였다.

본 연구에서 지상라이다 촬영 시 수목에 대한 현장 측정이 진행되어 지상라이다로 추출한 수목 데이터와 현장 측정 데이터를 비교하였다면 지상라이다 수집 데이터의 정확도를 파악하여 더 정확한 결과가 도출될 수 있을 것이다. 본 연구의 지상라이다 촬영은 본 연구에서 이용한 지상라이다 장비의 정확도에 대한 연구를 참고하여 진행하였으며, 관련 연구에 따르면 Leica사의 BLK360 장비로 취득한 데이터는 실제 위치한 물체의 형상과 약 1cm 이내의 오차를 보였으며 실제 형상에 거의 근접한 데이터를 취득할 수 있는 것으로 나타났다(Calantropio et al. 2018; Ramezani et al. 2020).

마지막으로 본 연구는 가로수 수직적 구조에 따른 열쾌적성 개선 효과를 파악하기 위한 파일럿 스터디로써 가로수의 표본 수 부족 및 가로수 주변의 다양한 환경 요인, 수목의 생리적 기능 등에 대한 세부적인 항목을 포함하지 못한 한계가 존재한다. 열 환경에서는 본 연구에서 고려한 요인뿐만 아니라 주변 건물 및 도로의 위치, 바람의 방향 및 속도, 수목의 증발산 기능 등의 요인들이 복합적으로 작용하여 영향을 미치기 때문에 분석 항목을 추가하여 평가할 필요가 있다. 따라서 향후 연구는 다양한 표본 가로수의 데이터 추가적으로 구축하고 열 환경에 영향을 미치는 요인들을 고려하여 열쾌적성 개선 효과를 평가하는 것이 필요하며, 이를 통해 도

시 가로수의 계획과 관리를 위한 구체적인 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Abreu-Harbich LV · Labaki LC and Matzarakis A. 2015. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*. 138: 99-109.
- Błażejczyk K · Jendritzky G · Bröde P · Fiala D · Havenith G · Epstein Y · Psikuta A and Kampmann B. 2013. An introduction to the Universal Thermal Climate Index(UTCI). *Geographia Polonica*. 86(1): 5-10.
- Bröde P · Fiala D · Błażejczyk K · Holmér I · Jendritzky G · Kampmann B · Tinz B and Havenith G. 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*. 56: 481-494.
- Byomkesh T · Nakagoshi N and Dewan AM. 2012. Urbanization and green space dynamics in Greater Dhaka, Bangladesh. *Landscape and Ecological Engineering*. 8: 45-58.
- Byun WH and Kim KW. 2010. Theory and practice of urban forest. Seoul: Ichae. (in Korean)
- Calantropio A · Chiabrando F · Rinaudo F and Lose LT. 2018. Use and evaluation of a short range small quadcopter and a portable imaging laser for built heritage 3D documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 42-1: 71-78.
- Choe H · Thorne JH. 2019. Omnidirectional connectivity of urban open spaces provides context for local government redevelopment plans. *Landscape and Ecological Engineering*.

- 15: 245-251.
- Coutts AM · White EC · Tapper NJ · Beringer J and Livesley SJ. 2016. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*. 124: 55-68.
- Fiala D · Havenith G · Bröde P · Kampmann B and Jendritzky G. 2012. UTCI-Fiala multi- node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*. 56: 429-441.
- Gillner S · Vogt J · Tharang A · Dettmann S and Roloff A. 2015. Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*. 143: 33-42.
- Haaland C and Bosch CK. 2015. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*. 14: 760-771.
- Han BH · Kwak JI and Kim HS. 2013. Influence factors of street environment for provision and management of street green. *Korean Society of Environment and Ecology*. 27(2): 253-265. (in Korean with English summary)
- Havenith G · Fiala D · Błazejczyk K · Richards M · Bröde P · Holmér I · Rintamaki H · Benshabat Y and Jendritzky G. 2012. The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology*. 56: 461-470.
- ISO 7726. 1998. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. The International Organization for Standardization report.
- Jim CY and Chen SS. 2003. Comprehensive greenspace planning based on landscape ecology principles in compact Nanjing city, China. *Landscape and Urban Planning*. 65: 95-116.
- Jo HK and Ahn TW. 2009. Impacts of three-dimensional land cover on urban air temperatures. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture(KILA)*. 37(3): 54-60. (in Korean with English summary)
- Jo SM · Hyun CJ and Park SK. 2017. Analysis of the influence of street trees on human thermal sensation in summer. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture (KILA)*. 45(5): 105-112. (in Korean with English summary)
- Kántor N and Unger J. 2011. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment - the mean radiant temperature. *Central European Journal of Geosciences*. 3(1): 90-100.
- Kim EB · Kim NC · Shin JH · Song WK and Kim DH. 2017. Temperature Reduction Effect According to Light Transmittance of Urban Street Trees -Focused on Seocho-gu in Seoul -. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 20(3): 45-54. (in Korean with English summary)
- Kwon YJ · Lee DK and Ahn S. 2019. Urban street planting scenarios simulation for micro-scale urban heat island effect mitigation in Seoul. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 28(1): 23-34. (in Korean with English summary)
- Li X and Ratti C. 2018. Mapping the spatial distribution of shade provision of street trees in Boston using Google Street View panoramas. *Urban Forestry & Urban Greening*. 31: 109-119.
- Liang X · Kankare V · Hyypä J · Wang Y · Kukko A · Haggrén H · Yu X · Kaartinen H

- Jaakkola A · Guan F · Holopainen M and Vastaranta M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 115: 63-77.
- Malhi Y · Jackson T · Bentley LP · Lau A · Shenkin A · Herold M · Calders K · Bartholomeus H and Disney MI. 2018. New perspectives on the ecology of tree structure and tree communities through terrestrial laser scanning. *Interface Focus*. 8: 1-10.
- Oh KS and Hong JJ. 2005. The relationship between urban spatial elements and the urban heat island effect. Urban Design Institute of Korea. 6(1): 47-63. (in Korean with English summary)
- Park C · Lee DK · Sung S · P J and Jeong S. 2016. Analyzing the diurnal and spatial variation of surface urban heat island intensity distribution. *Journal of Korea Planning Association*. 51(1): 125-136. (in Korean with English summary)
- Park CY · Lee DK and Yoon JH. 2018. Estimating the urban radiation heat flux distribution and the reduction effect of building and tree shade. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 21(6): 1-13. (in Korean with English summary)
- Park HS and Lee HM. 2007. A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 22: 19-30.
- Park S · Tuller SE and Jo M. 2014. Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. *Landscape and Urban Planning*. 125: 146-155.
- Pretzsch H · Biber P · Uhl E · Dahlhausen J · Rötzer T · Caldentey J · Koike T · Con T · Chavanne A · Seifert T · Toit B · Farnden C and Pauleit S. 2015. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening*. 14: 466-479.
- Qiu GY · Zou Z · Li X · Li H · Guo Q · Yan C and Tan S. 2017. Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China. *Habitat International*. 68: 30-42.
- Ramezani M · Wang Y · Camurri M · Wisth D · Mattamala M and Fallon M. 2020. The newer college dataset: handheld LiDAR, inertial and vision with ground truth. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Oct 2020: 4353-4360.
- Ryu NH and Lee CS. 2018. The effect of shading on pedestrians' thermal comfort in the E-W street. *The Korean Institute of Landscape Architecture(KILA)*. 46(6): 60-74. (in Korean with English summary)
- Salmond JA · Tadaki M · Vardoulakis S · Arbuthnott K · Coutts A · Demuzere M · Dirks KN · Heaviside C · Lim S · Macintyre H · McInnes RN and Wheeler BW. 2016. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health*. 15(1): 96-171.
- Sanusi R · Johnstone D · May P and Livesley SJ. 2016. Street orientation and side of the street greatly influence the microclimatic benefits street trees can provide in summer. *Journal of Environmental Quality*. 45: 167-174.
- Shashua-Bar L and Hoffman ME. 2000. Vegetation

- as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*. 31: 221-235.
- Thorne JH · Choe H · Boynton RM and Lee DK. 2020. Open space networks can guide urban renewal in a megacity. *Environmental Research Letters*. 15(9): 1-12.
- Thorsson S · Lindberg F · Eliasson I and Holmer B. 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*. 27: 1983-1993.
- Troxel B · Piana M · Ashton MS and Murphy-Dunning C. 2013. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA. *Urban Forestry & Urban Greening*. 12: 144-153.
- Tzoulas K · Korpela K · Venn S · Yli-Pelkonen V · Kaźmierczak A · Niemela J and James P. 2007. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*. 81: 167-178.
- Wolch JR · Byrne J and Newell JP. 2014. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’. *Landscape and Urban Planning*. 125: 234-244.
- Wood EM and Esaian S. 2020. The importance of street trees to urban avifauna. *Ecological Applications*. 30(7): e02149.
- Yan Z · Liu R · Cheng L · Zhou X · Ruan X and Xiao Y. 2019. A concave hull methodology for calculating the crown volume of individual trees based on vehicle-borne LiDAR data. *Remote Sensing*. 11: 1-19.
- Yun SH · Lee DK and Park CY. 2020. Analyzing Change of Discomfort Index for Transpiration of Street Tree. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 23(5): 29-43. (in Korean with English summary)
- Zhang J and Gou Z. 2021. Tree crowns and their associated summertime microclimatic adjustment and thermal comfort improvement in urban parks in a subtropical city of China. *Urban Forestry & Urban Greening*. 59: 126912.

Appendix

No.	Species	Tree height (m)	Crown diameter (m)	Clear length (m)	DBH (cm)	Crown surface area (m ²)	Crown volume (m ³)
1	<i>Zelkova serrata</i>	7.42	5.80	2.34	29	23.02	37.07
2	<i>Zelkova serrata</i>	7.60	5.70	3.24	49	22.20	32.67
3	<i>Zelkova serrata</i>	7.19	5.21	2.41	19	10.23	15.37
4	<i>Zelkova serrata</i>	8.02	9.65	2.18	31	63.81	159.36
5	<i>Zelkova serrata</i>	7.23	6.18	2.54	24	28.50	52.86
6	<i>Pinus koraiensis</i>	9.89	7.51	2.23	23	42.52	79.70
7	<i>Zelkova serrata</i>	8.52	8.25	3.07	33	46.64	97.69
8	<i>Pinus koraiensis</i>	10.33	8.43	1.69	27	44.33	120.05
9	<i>Zelkova serrata</i>	8.88	9.83	2.60	35	72.43	184.67
10	<i>Pinus koraiensis</i>	10.15	6.45	2.13	22	26.52	69.85
11	<i>Pinus koraiensis</i>	10.08	4.80	2.59	17	14.51	23.66
12	<i>Pinus koraiensis</i>	9.71	4.66	2.13	17	15.43	26.96
13	<i>Pinus koraiensis</i>	8.49	4.48	2.38	56	11.03	20.69
14	<i>Zelkova serrata</i>	7.65	7.10	2.57	20	33.71	63.96
15	<i>Pinus koraiensis</i>	11.01	6.38	2.72	26	25.62	47.15
16	<i>Zelkova serrata</i>	7.60	7.89	2.88	37	44.99	81.84
17	<i>Pinus koraiensis</i>	9.83	5.26	2.49	30	18.55	31.99
18	<i>Pinus koraiensis</i>	8.72	6.44	2.73	23	24.22	32.90
19	<i>Zelkova serrata</i>	6.70	7.23	2.44	41	32.17	49.67
20	<i>Pinus koraiensis</i>	7.60	4.93	2.26	18	12.79	23.03
21	<i>Zelkova serrata</i>	6.28	6.10	1.80	21	25.57	42.10
22	<i>Zelkova serrata</i>	6.47	4.85	2.36	20	17.05	27.28
23	<i>Zelkova serrata</i>	8.33	9.35	2.56	31	64.97	140.64
24	<i>Zelkova serrata</i>	6.34	6.31	1.99	25	28.32	47.81
25	<i>Acer buergerianum</i>	8.63	5.48	2.03	31	20.63	45.93
26	<i>Acer buergerianum</i>	8.83	6.12	1.78	40	24.91	60.32
27	<i>Acer buergerianum</i>	9.55	6.62	2.07	32	28.05	75.67
28	<i>Acer buergerianum</i>	10.31	7.32	2.31	26	38.47	99.78
29	<i>Acer triflorum</i>	8.11	6.74	2.29	23	31.05	63.00
30	<i>Acer triflorum</i>	10.38	8.66	2.38	34	54.02	156.35
31	<i>Zelkova serrata</i>	8.06	6.98	2.32	23	35.67	59.74
32	<i>Pinus densiflora</i>	7.62	5.39	2.89	22	17.65	27.92