

여름철 인간 열환경지수에 미치는 가로수의 영향 분석[†]

조상만* · 현철지* · 박수국**

[†]제주대학교 생명자원과학대학 원예학과 대학원
^{**}제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공 · 아열대농업생명과학연구소 · 친환경농업연구소

Analysis of the Influence of Street Trees on Human Thermal Sensation in Summer

Jo, Sang-man* · Hyun, Cheol-ji* · Park, Soo-kuk**

*Graduate School of Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University

**Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, SARI, Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University

ABSTRACT

In order to analyze the effect of street trees on human thermal sensation(thermal comfort) in summer, microclimatic data were measured and analyzed at sunny and shaded locations of two deciduous broadleaf and three broadleaf evergreen species of street trees. As a result, the mean differences by species in air temperature, relative humidity and wind speed were small: 0.2~1.5°C, 0.9~5.3% and 0.1~0.5 ms⁻¹, respectively, but the mean difference in the mean radiant temperature was great, 27.1°C. In the results of physiological equivalent temperature(PET) and universal thermal climate index(UTCI), which are human thermal sensation(thermal comfort) indexes, the shaded locations by the trees showed mean reduction rates of 21.2~31.3% in the PET compared with the sunny location, which are equivalent to 1.5~2.5 levels of thermal perception. Also, 12.7~20.0% in the UTCI was reduced by the trees' shadows, which is equivalent to 1~1.5 levels of heat stress. In addition, although the broadleaf evergreen trees had 5% greater mean reduction in PET than that of the deciduous broadleaf trees, the *Zelkova serrata* that belonged to the deciduous broadleaf trees showed the equivalent thermal reduction effect as the broadleaf evergreen trees because of the high density of branches and leaves. Therefore, the mean radiant temperature and the density of the crown(branches and leaves) were the main influences in thermal modification by these street trees in summer.

Key Words: Thermal Comfort, Urban Trees, Thermal Modification, PET, UTCI

[†]: This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(No. 2015R1C1A1A01054794).

Corresponding author: Soo-kuk Park, Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, SARI, Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University, Jeju 63243, Korea, Tel: +82-64-754-3326, E-mail: sooland@jejunu.ac.kr

국문초록

가로수가 여름철 인간 열환경지수(열쾌적성)에 미치는 영향을 분석하기 위해, 낙엽활엽교목 2종과 상록활엽교목 3종 총 5종의 가로수를 대상으로 수목 하부의 음지와 그 옆의 양지에서 미기후 자료를 측정하여 비교 분석하였다. 그 결과, 기온, 상대습도, 풍속의 차이는 각각 평균 0.2~1.5°C, 0.9~5.3%, 0.1~0.5ms⁻¹로 미비하였으나, 평균복사온도는 평균 27.1°C의 매우 큰 차이를 보여 주었다. 인간 열환경지수인 PET와 UTCI 결과에서는 수목 하부의 음지가 양지에 비해 PET에서는 평균 21.2~31.3%의 저감 비율을 보여 1.5~2.5단계의 열지각 개선 효과를 나타내었으며, UTCI에서는 평균 12.7~20.0%의 저감 비율을 보여 1~1.5단계의 heat stress 저감 효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 상록활엽교목이 낙엽활엽교목에 비해 PET에서 평균 5% 더 높은 저감 비율을 나타냈지만, 낙엽활엽교목에 속하는 느티나무는 지엽의 밀도가 높아 상록활엽교목 만큼의 열환경지수(열쾌적성) 개선 효과를 나타내었다. 이에 따라, 가로수의 여름철 열 저감 효과에서 지엽의 밀도와 평균복사온도가 주요 영향임을 알 수 있었다.

주제어: 열쾌적성, 도시 수목, 열개선, 생리등가온도, 범용열기후지수

1. 서론

21세기 도시는 무분별한 개발로 인해 도시열섬현상이 빈번히 일어나고 있으며, 지구 온난화로 인해 하절기 폭염현상과 열대야가 더 강하고, 길어지고 있는 현실이다(IPCC, 2013). 이와 같은 도시의 기후 변화 징후는 도시의 열환경 개선에 대한 중요성을 제고시키며, 열환경적으로 쾌적한 공간 확보를 위한 노력이 필요함을 시사한다.

최근 국내에서는 도시 열환경 개선을 위해 조경포장재료, 물순환체계 형성 및 수공간 조성, 차양 및 수목의 영향에 대한 연구 등 다양한 조경소제에 대한 연구들은 많이 이루어졌으나(Lee and Ryu, 2010; 2012; 2013; Park *et al.*, 2011), 도시의 열환경 개선에 가장 중요한 역할을 하는 조경수목의 미기후 및 인간 열환경지수(열쾌적성) 개선 효과에 대한 연구들은 미진한 상태이다.

조경수목의 인간 열환경 개선에 대한 국내의 연구들은 대부분 공원과 녹지에 대한 연구들(Lee and Ryu, 2012; Park, 2013; Yoon, 2003; Yoon *et al.*, 2014)이 주를 이루었으며, 단독수(Choi and Lee, 2006; Ju *et al.*, 2004; Lee and Ryu, 2014)와 가로수(Ahn *et al.*, 2013; Park, 2013)에 대한 연구들은 많지 않다. 단독수에 관한 연구들은, 도심 녹음수(회화나무와 느티나무)의 엽면적 지수(Leaf Area Index: LAI)가 4.0이상일 때 습후구온도(Wet-Bulb Globe Temperature: WBGT)에 영향을 미친다는 연구(Ju *et al.*, 2004), 느티나무의 하절기 수목하부의 음영부와 수목 외측의 양지를 기준으로 기온과 태양·지구복사에너지 환경을 비교하여 열 저감 효과에 관한 연구(Choi and Lee, 2006), 하절기 수형이 서로 다른 3종의 조경용 녹음수(배롱나무, 대왕참나무, 참느릅나무) 수관 하부와 노출된 상태에서의 일사 및 온도분포 특성을 비교하기 위하여 인접한 잔디광

장을 대조구로 설정하여 일사량과 건구·후구온도를 바탕으로 한 평균복사온도를 비교한 연구(Lee and Ryu, 2014)가 있었다. 가로수의 열 저감 효과에 대한 연구들은, 수종의 선택뿐만 아니라, 식재방식에 따라서 열환경 개선 효과가 달라진다는 연구(Park, 2013)와 도심 가로 녹음의 WBGT 측정과 보행자 행태 및 설문조사를 통한 보행자 열쾌적성 효과를 분석한 연구(Ahn *et al.*, 2013)가 있었으나, Ahn *et al.*(2013)의 연구는 건구·습구·후구온도 측정 시 태양직사광선만 막아줄 수 있는 삼각 지붕형태의 가림막만을 이용함으로써 지표면에서 유입되는 태양 반사광선과 지구복사에너지 등의 영향을 배제하지 못하여 자료에 대한 신뢰성 문제가 발생하였다.

국외의 연구에서도 2종의 상록활엽교목(*Mesua ferrea* L. and *Hura crepitans* L.)을 대상으로 인간 열쾌적성 향상을 위해 수형에 따른 그림자 패턴과 수목의 태양복사에너지 차단에 따른 열 저감 효과에 관한 연구(Shahidan *et al.*, 2010), 헝가리에서 이용률이 높은 놀이터를 대상으로 여름철과 가을철 수목에 의한 그늘효과에 관한 연구(Égerházi *et al.*, 2013), 12종의 다양한 단독수와 가로수를 대상으로 인간 열환경지수인 Physiological Equivalent Temperature(PET)를 분석한 연구(Abreu-Harbich *et al.*, 2015), 헝가리에서 4종의 수목을 대상으로 수목하부인 음지와 인접한 양지에서 미기후요소인 기온, 상대습도, 태양·지구복사에너지양의 변화를 비교 분석한 연구(Takács *et al.*, 2016)만이 수행되었다. 그러므로, 앞으로 조경수의 수종 및 수형에 따른 열환경 개선에 대한 자료 구축이 더 이루어져야 할 것이다.

이에 따라 본 연구에서는 가로수로 많이 사용되는 수목의 성상(낙엽활엽교목, 상록활엽교목)에 따라 수목 하부(음지)와 그 옆의 오픈스페이스 지점(양지)에서 동시에 측정된 미기후 자료를 통해 여름철 가로수에 대한 인간 열환경지수의 개선 정

도를 비교분석하여 보았다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 추 후 가로수 선정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구방법

1. 연구대상지

여름철 인간 열환경지수에 미치는 가로수의 영향을 분석하기 위해 제주특별자치도(Jeju island: 126°09'~127°00'E, 33°10'~34°35'N)의 범위에 위치하며, 면적 1,845.88km², 해안선 길이 253km) 안에서 가장 많이 사용되는 가로수 중 낙엽활엽교목 2종(왕벚나무, 느티나무), 상록활엽교목 3종(구실잣밤나무, 담팔수, 먼나무)을 선정하였다(Figure 1 참조). 제주대학교 본관 앞의 왕벚나무(*Prunus yedoensis*, H6.1×W8.5×B31, 7m 식재간격), 구산로 63 제주지방해양경비안전본부 앞의 구실잣밤나무(*Catanopsis sieboldii*, H6.9×W9.1×R22, 8m 식재간격), 연삼로 537에 위치한 느티나무(*Zelkova serrata*, H6.4×W5.7×R25, 12m 식재간격), 신대로 109 연동주민센터 앞의 담팔수(*Elaeocarpus sylvestris*, H9.6×W9.0×R28, 7~8m 식재간격), 서귀포시 신중로 55 서귀포시청 제2청사 앞의 먼나무(*Ilex rotunda*, H5.6×W7.4×R21, 7m 식재간격)가 있는 가로수 길을 연구 대상으로 하였다(Figure 2 참조). 주변의 영향을 배제하기 위하여, 가로수 길 중 타 수목의 영향이 없고, 건물의 영향이 거의 없는 지점을 골라 미기후자료를 측정하였다.

제주특별자치도의 북제주(제주시) 지방의 연평균 기온은 14.7℃, 1월 평균기온이 4.8℃, 8월 평균기온이 25.8℃인데 비하

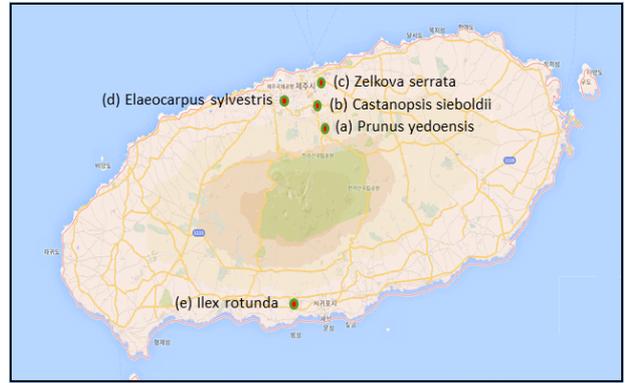


Figure 1. Study sites

여, 남제주(서귀포시) 지방의 연평균 기온은 15.6℃, 1월 평균기온이 6.0℃, 8월 평균기온이 26.6℃이다. 연강수량은 1,440mm(제주시)~1,688mm(서귀포시)로 우리나라 최다우 지역에 해당한다.

2. 미기후 요소 측정

미기후 요소 측정은 맑은 날을 기준으로 총 5종의 가로수를 각각 1일 동안 9:30~17:00동안 이루어졌으나, 가로수의 최대 열 저감 효과를 알아내기 위해서 구름이 낀 시간을 제외한 맑은 시간만을 분석에 이용하였다. 왕벚나무는 2015년 7월 30일 10:00~11:30, 구실잣밤나무는 7월 31일 10:00~16:30, 느티나무는 8월 4일 9:30~16:30, 담팔수는 8월 5일 9:30~17:00, 먼나무는 8월 6일 10:00~17:00까지의 자료가 비교 분석되었

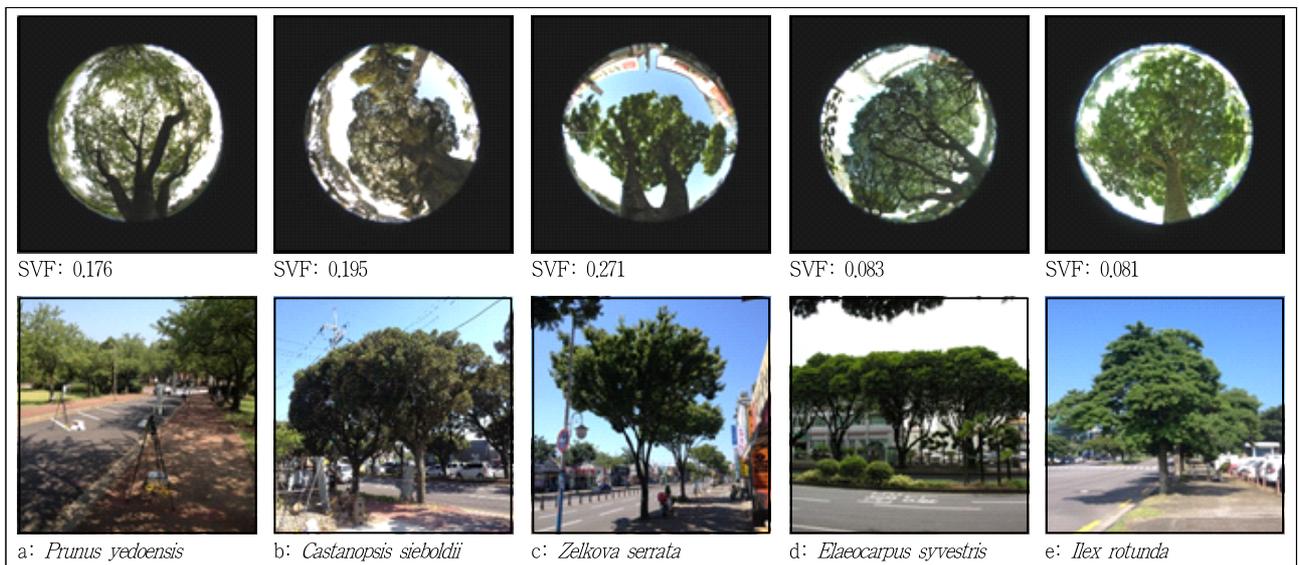


Figure 2. Fisheye lens photographs and pictures of five tree species. Fisheye lens photographs were taken using Nikon Coolpix 8800 camera with Nikon FC-E9 Fisheye converter lens and Nikon UR-E18 converter adapter, and sky view factor(SVF) of the photographs were calculated with BMSky-view(Gál *et al.*, 2007)

다. 미기후 측정요소인 기온과 상대습도는 HMP155A(Campbell Scientific Inc.; <http://campbellsci.com>), 풍속 및 풍향은 Met One 034B-L Windset(Campbell Scientific Inc.)을 이용하여 신체의 가슴높이인 지표면으로부터 1.2m 높이에서 매 1분 단위로 측정되었다(Table 1 참조). 태양 및 지구복사에너지는 CNR4 Net-radiometer(Kipp & Zonen Inc.; <http://kippzonen.com>)를 이용하여 동일한 높이에서 매 5초 단위로 측정되었다. 모든 자료들은 CR1000 datalogger(Campbell Scientific Inc.)에 저장되었다. 측정 위치는 해당 수목의 하부 음지 지점 2곳과 해당 수목 주변의 양지인 오픈스페이스 지점 1곳에 설치하여 실시간으로 관측하였다(Figure 3 참조).

3. 인간 열환경지수 분석 방법

측정된 미기후 자료를 이용하여 인간 열환경지수인 PET와 Universal Thermal Climate Index(UTCI)를 Rayman Pro, Version 2.2(<http://www.urbanclimate.net/rayman>; Figure 4)를 이용하여 계산하였다. 인간 열환경지수인 PET와 UTCI 계산을 위해 필요한 입력 자료는 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mrt})이다. T_{mrt} 는 측정된 태양 및 지구복사에너지를 이용하여 Park(2011)의 방법으로 계산되었다. 기온, 상대습도, 풍속, T_{mrt} 와 인간 열환경지수인 PET, UTCI는 30분 평균값을 Microsoft Office Excel 2010 (<https://www.office.com>)을 이용하여 비교분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 미기후 요소

미기후자료 측정 결과, 5종의 가로수에서 기온은 구실잣밤나무에서만 수목주변의 양지가 수목하부의 음지보다 평균 1.5°C (최대 3.1°C) 높게 나타났고, 다른 가로수들은 느티나무가 평균 0.7°C로 조금 높게 나타났고, 왕벚나무·담팔수·먼나무는 평균 0.2~0.3°C로 양지와 음지간의 기온차이는 거의 없는 것으로

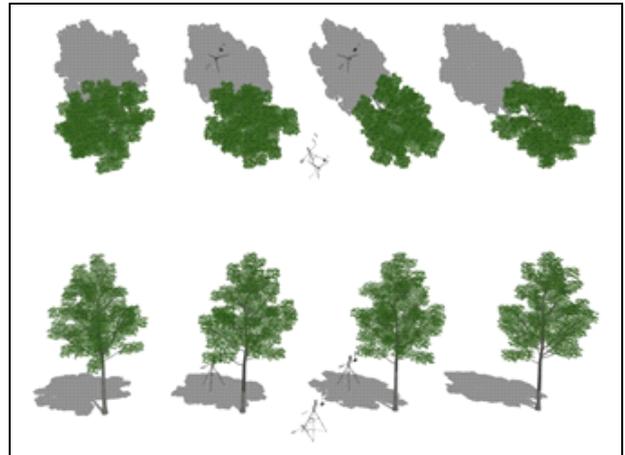


Figure 3. Instruments setup for microclimatic data collection

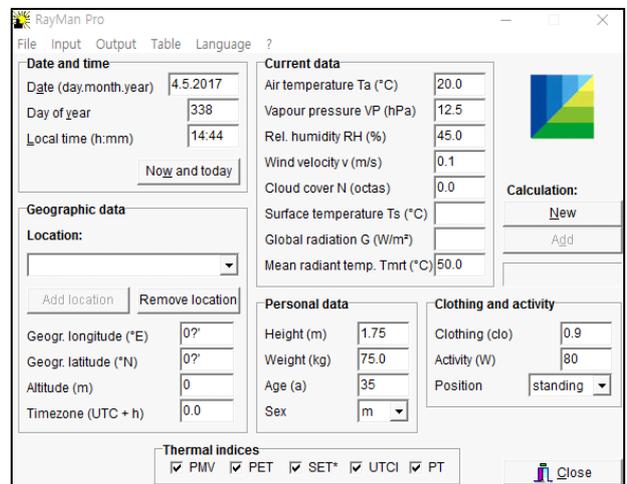


Figure 4. RayMan Pro, Version 2.2(Matzarakis *et al.*, 2010)

나타났다(Figure 5; Table 2 참조). 구실잣밤나무, 느티나무, 담팔수가 있는 도로는 왕복 6차선으로 교통량이 많은 도로이지만, 위와 같이 다른 결과를 나타내므로, 도로의 폭이나 교통량이 영향을 미쳤다고는 보기 어렵다. 다만, 구실잣밤나무에서만 가장 큰 차이를 나타낸 이유는 양지의 지점이 수목에서 도

Table 1. Instruments for microclimatic data

Instrument			
Data	Name	Accuracy	Manufacture
Radiation	CNR4 net radiometer	≤ 1% (-40~80°C)	Kipp & Zonen Inc
Air temp. and relative humidity	HMP155A	· Air temp.: ±0.3°C (-80~60°C) · Relative humidity: 2%(0~90%) 3%(90~100%)	Campbell Scientific Inc
Wind speed and direction	Met one 034B-L Windset	· Wind speed: ±0.1 ms ⁻¹ (≤ 10.1 ms ⁻¹) ±1.1%(≥ 10.1 ms ⁻¹) · Wind direction: ±4°	
Datalogger	CR1000	±0.06%(0~40°C)	

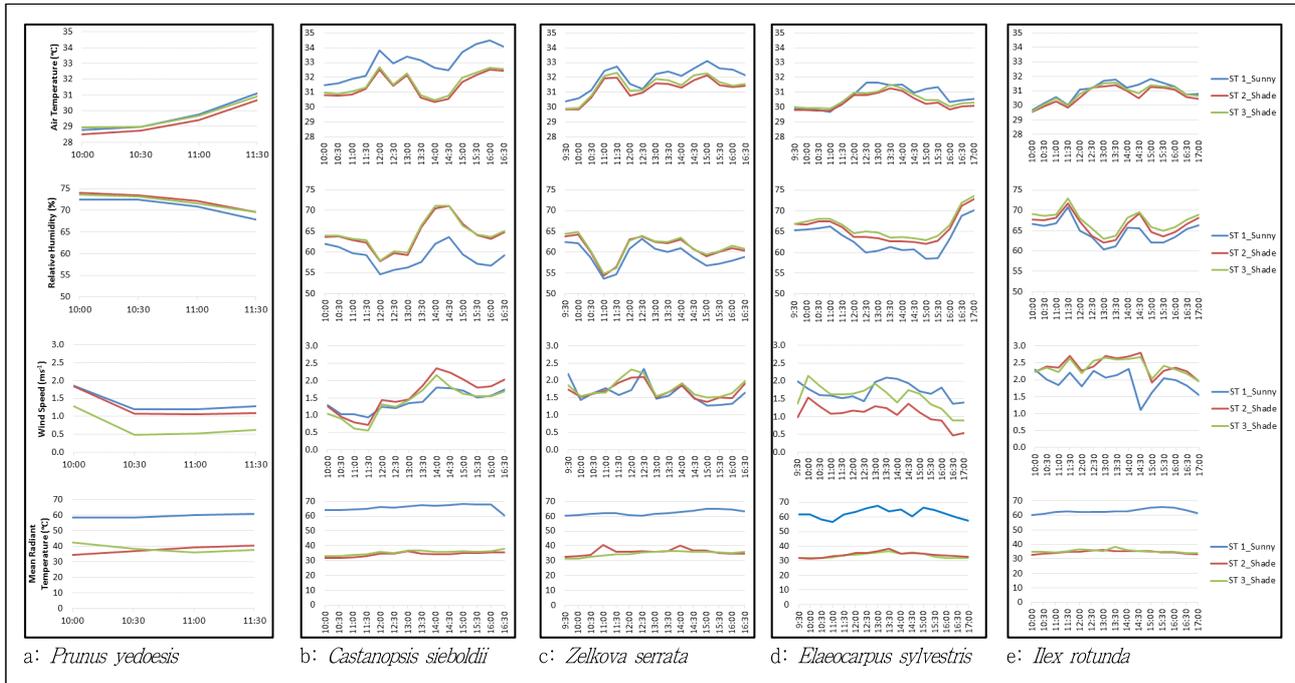


Figure 5. Microclimatic factors of five tree species

Table 2. Mean±standard deviation(maximum) values of shading effects of five tree species. These results were from the values of sunny locations minus the values of shaded locations. T_a , RH and u mean air temperature, relative humidity and wind speed, respectively

Species	T_a (°C)	RH(%)	u (ms^{-1})	T_{mrt}		PET		UTCI	
				°C	%	°C	%	°C	%
<i>Prunus yedoensis</i>	0.2±0.2 (0.6)	-0.9±1.1 (-4.2)	0.4±0.4 (1.4)	21.4±3.7 (24.4)	36.0±6.3 (41.7)	8.9±1.7 (12.1)	21.2±4.1 (28.9)	5.0±0.9 (6.3)	12.7±2.4 (16.5)
<i>Zelkova serrata</i>	0.7±0.3 (1.6)	-2.0±1.0 (-5.7)	0.1±0.3 (1.4)	26.9±2.9 (30.5)	43.1±4.4 (49.0)	12.0±1.8 (16.6)	27.0±3.4 (36.0)	7.0±0.9 (8.8)	17.2±2.2 (21.2)
<i>Castanopsis sieboldii</i>	1.5±0.6 (3.1)	-5.3±2.4 (-12.2)	0.1±0.5 (1.6)	30.9±2.9 (33.9)	47.0±3.6 (51.6)	14.8±1.6 (18.4)	31.3±2.9 (37.4)	8.5±1.0 (11.1)	20.0±2.1 (25.5)
<i>Elaeocarpus sylvestris</i>	0.3±0.5 (1.8)	-2.8±1.6 (-7.6)	0.4±0.6 (2.2)	28.5±3.8 (35.2)	45.4±4.0 (51.1)	11.7±2.2 (16.0)	27.0±3.9 (34.2)	6.6±1.2 (9.1)	16.6±2.8 (22.1)
<i>Ilex rotunda</i>	0.3±0.4 (1.7)	-2.1±1.3 (-6.1)	0.5±0.6 (3.0)	28.1±2.2 (31.9)	44.5±2.9 (48.2)	11.9±1.8 (18.8)	27.5±3.1 (38.5)	7.0±0.9 (10.8)	17.6±2.0 (25.7)

보 쪽으로 5m안쪽에 위치한 자갈로 피복된 주차장에 위치되어 피복재료가 영향을 주었으리라 생각된다.

상대습도는 평균 0.9~5.3%(최대 4.2~12.2%)로 차이가 작게 나타났다. 구실잣밤나무에서 음지가 평균 5.3%로 가장 크게 나타났고, 다른 가로수들은 평균 0.9~2.8%로 차이가 미미하였다. 그러나, 구실잣밤나무에서도 양지와 음지의 기온차가 다른 가로수에 비해 좀 크게 나서 상대습도의 차이가 다른 가로수에 비해서 크게 낮으나, 절대습도(absolute humidity)로 계산해 본 결과, 양지 평균 21.0 gm^{-3} , 음지 두 지점 21.0 gm^{-3} , 21.3 gm^{-3} 으로 나와 실제로 가로수에서 음지와 양지에서 습도의 차이는 없다고 하겠다.

풍속은 양지와 음지 지점의 차이가 평균 $0.1\sim0.5\text{ms}^{-1}$ 으로 차이가 크지는 않는 것으로 관측되었다. 이것도 왕벚나무와 먼 나무에서 차이가 평균 0.4ms^{-1} , 담팔수에서 평균 0.5ms^{-1} 로 낙엽활엽교목과 상록활엽교목의 차이는 나타나지 않았다. 또한, 풍향에 따라서 측정장비에서 관측된 풍속은 달라질 수 있어, 양지에서 풍속이 더 낮은 경우도 발생하였다. 그러나, 그 차이들은 수목에 의한 풍속저감현상이 발생한다는 것을 잘 보여 주었다고 하겠다.

반면에, 평균복사온도는 양지와 음지에서 확연한 차이를 나타내었다. 측정된 5종의 가로수에서 태양복사에너지의 영향을 직접적으로 받는 양지에서는 평균 62.5°C 를 나타낸 반면, 음지

에서는 평균 35.4℃로 두 지점 간 평균 27.1℃의 큰 차이를 보였다. 수종별 차이를 보면, 낙엽활엽교목인 왕벚나무(평균 21.4℃)와 느티나무(평균 26.9℃)가 상록활엽교목인 구실잣밤나무(평균 30.9℃), 담팔수(평균 28.5℃), 먼나무(평균 28.1℃)에 비해 작은 차이를 보였다(Table 2 참조). 비율적으로도 왕벚나무(평균 36.0%), 느티나무(평균 43.1%), 구실잣밤나무(평균 47.0%), 담팔수(평균 45.4%), 먼나무(평균 44.5%)로 상록활엽교목이 낙엽활엽교목에 비해 복사에너지 차감효과가 더 높은 것을 알 수 있었다. 그러나, 수관의 지엽이 밀생되어 있는 느티나무는 상록활엽교목과 유사한 결과를 보여주는 것으로 나타나, 수목성상이 아니라 수관의 투과율(지엽의 밀집도)이 복사에너지 저감에 큰 영향을 끼친다고 할 것이다(Figure 2c 참조). 시간대별 평균복사온도의 차이는 모든 가로수에서 일정 비율을 유지하는 것으로 나타났다(Figure 5 참조).

2. 인간 열환경지수

5종의 가로수에서 인간 열환경지수인 PET와 UTCI를 이용하여 수목 그늘 하부 음지의 열 저감 효과를 분석해 본 결과, 가로수의 양지는 더움(hot)~매우 더움(very hot)으로 나온 반면, 음지는 따뜻함(warm)으로 나와, 음지가 양지에 비해 평균 8.9~14.8℃ PET 낮은 결과를 보였는데(Figure 6; Table 2), 이 차이는 PET의 열지각(thermal perception) 단계 중 1.5~2.5 단계의 차이를 보여주는 것으로 매우 큰 열 저감 효과를 보

인다고 할 수 있다(Table 3 참조). 최대값을 비교해 보면, 구실잣밤나무와 먼나무에서 최대 18.4℃, 18.8℃로 가장 큰 차이를 나타냈으며, 왕벚나무에서 최대 12.1℃로 가장 낮은 값을 나타냈다. 이 차이는 왕벚나무에서 최대 2단계의 차이를, 구실잣밤나무와 먼나무에서 3단계의 차이가 날 수 있다는 것을 보여주었다. 그러나, Figure 6의 양지에서의 PET와 UTCI 결과를 비교해 보면, 측정날짜에 따라 어느 정도의 열환경의 차이를 알 수 있다. 그러므로, 수목의 열 저감 효과 분석을 위해서는 단순한 양지와 음지의 PET·UTCI 차이를 비교하는 것보다는 저

Table 3. The levels of physiological equivalent temperature(PET) and universal thermal climate index(UTCI) (Jung *et al.*, 2016)

Thermal perception	PET(℃)	UTCI(℃)	Grade of physiological stress
Very cold	<4	<-40	Extreme cold stress
Cold	4~8	-27~-40	Very strong cold stress
		-13~-27	Strong cold stress
Cool	8~13	0~-13	Moderate cold stress
Slightly cool	13~18	9~0	Slight cold stress
Neutral	18~23	9~26	No thermal stress
Slightly warm	23~29		Slight heat stress
Warm	29~35	26~32	Moderate heat stress
Hot	35~41	32~38	Strong heat stress
		38~46	Very strong heat stress
Very hot	>41	>46	Extreme heat stress

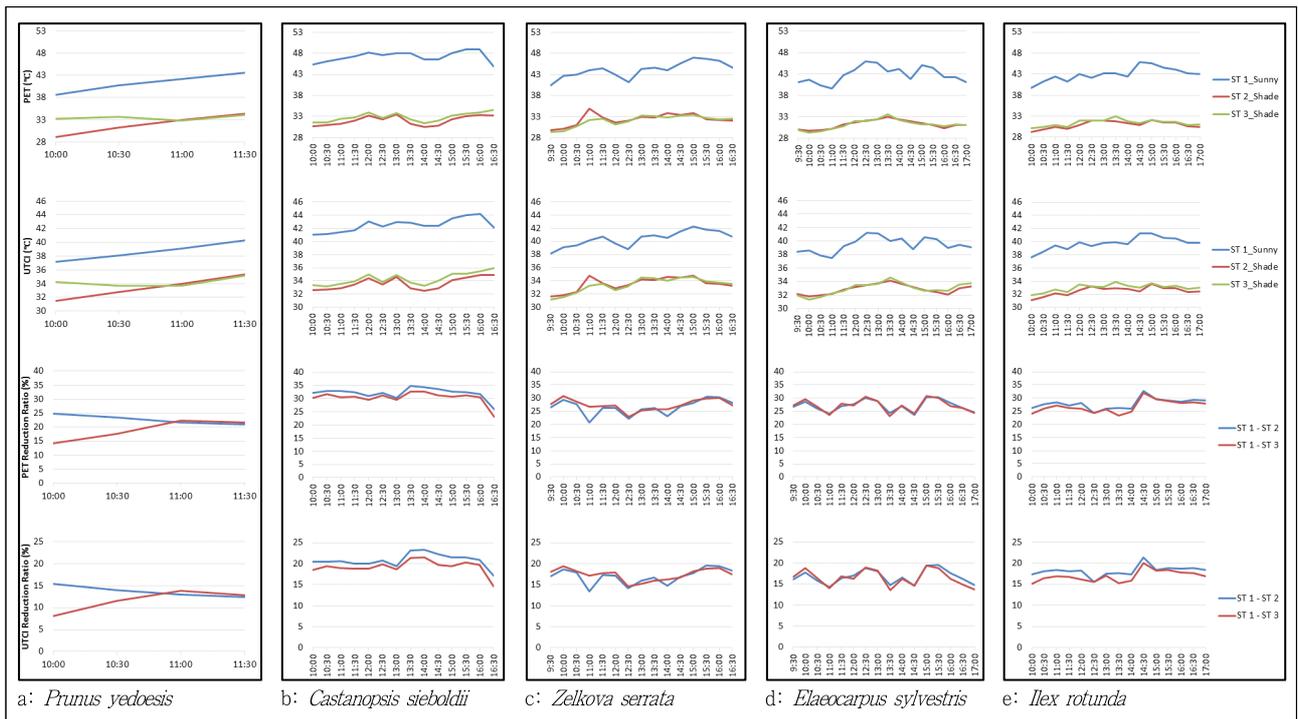


Figure 6. PET and UTCI values and their reduction ratios between sunny and shaded locations of five tree species

감 비율(%)을 비교하는 것이 더 바람직한 방법이라고 할 수 있겠다. 비율적으로는 PET에서 평균 21.2~31.3%의 저감 비율을 보였다. 수종별로는 구실잣밤나무(31.3%)>먼나무(27.5%)>담팔수와 느티나무(27.0%)>왕벚나무(21.2%) 순으로 열 저감 효과를 나타냈다. 이 차이는 평균복사온도에서 보여 주었던 순서와 유사하게 나타나, 인간 열환경지수인 PET에 평균복사온도가 큰 영향을 끼친다는 것을 잘 보여주는 것이다.

UTCI에서는 양지가 매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)를 받는 것으로 나타났고, 음지는 강한 열 스트레스(strong heat stress)를 받는 것으로 나타났다. 음지가 양지에 비해 평균 5.0~8.5°C의 낮은 결과를 보였으며, 구실잣밤나무에서 최대 11.1°C로 가장 큰 차이를 나타냈고, 왕벚나무에서 최대 6.3°C로 가장 작은 차이를 보였다. 이 차이는 1~1.5 단계의 열 스트레스(heat stress) 저감 효과를 나타내는 것이다. 비율적으로는 UTCI에서 평균 12.7~20.0%의 저감 비율을 보였다. 수종별로는 구실잣밤나무(20.2%)>먼나무(17.6%)>느티나무(17.2%)>담팔수(16.6%)>왕벚나무(12.7%) 순으로 열 저감 효과를 나타냈다. PET의 결과와 비교해 볼 때, 느티나무가 담팔수에 비해 더 높은 열 저감 효과를 보인 이유는, 기온에 민감하게 반응하는 UTCI에 비해 PET는 평균복사온도와 풍속에도 민감하게 반응하기 때문이다(Jung *et al.*, 2016).

시간대별로도 평균복사온도에서와 동일하게 양지에 비해 음지의 열 저감 비율은 일정하게 나타났다(Figure 6 참조). 수종별로도 평균복사온도에서와 같이 상록활엽교목(구실잣밤나무, 담팔수, 먼나무)이 낙엽활엽교목(왕벚나무, 느티나무)보다 더 높은 열 저감 효과가 있는 것으로 나타났으나, 지엽이 치밀했던 느티나무는 상록활엽교목과 비슷한 결과를 보였다.

3. 기존 연구와의 비교

인간 열환경지수 개선에 수목의 태양복사에너지 차감효과가 가장 크게 영향을 미친다고 할 수 있다(Park, 2012; 2013). 본 연구에서 왕벚나무 83.0%, 느티나무 90.2%, 구실잣밤나무 92.0%, 담팔수 90.9%, 먼나무 92.7%로 나타나, Takács *et al.* (2016)의 연구에서 여름철 4종의 수목의 태양복사에너지 차감율이 89~98%였던 것에 비해서는 조금 낮게 나왔으나, 왕벚나무를 제외하고는 90%를 넘는 높은 차감율을 보여주었다. Shahidan *et al.*(2010)의 연구에서는 상록활엽교목인 *Mesua ferrea* L.과 *Hura crepitans* L.에서 각각 93%, 79%의 차감율을 보이기도 하였다.

수목 하부의 음지는 양지에 비해 평균적으로 기온이 0.2~1.5°C의 저감 효과를 보였으며, 상대습도는 0.9~5.3% 높은 결과를 나타내었다. 이것은 Choi and Lee(2006)의 연구 중 느티나무(H7.0×W8.0)가 낮 시간대에 0.3~1.5°C의 저감 효과를 준다는 결과와 유사하였으며, Takács *et al.*(2016)의 평균 0.8°C

의 저감 효과와 2% 상대습도 상승 효과, Park(2013)의 단풍나무와 소나무가 0.3~0.4°C의 저감 효과와 4% 상승 효과를 준다는 결과와도 큰 차이를 보이지는 않았다. Abreu-Harbach *et al.* (2015)의 연구에서는 여름철 10:00~14:00동안 단독수는 0.9~2.8°C, 가로수는 0.7~2.0°C의 저감 효과를 보였는데, 본 연구에서 구실잣밤나무가 평균 1.5°C, 최대 3.1°C의 저감 효과를 보인 것과 비교해 보면 큰 차이는 나타나지 않았다.

평균복사온도에서는 수종에 따라 평균적으로 21.4~30.9°C의 저감 효과를 보여 주었는데, Choi and Lee(2006)의 15°C와 Lee and Ryu(2014)의 참느릅나무(H7.0×W5.3×R13) 11°C, 배롱나무(H4.6×W4.8×R28) 13°C, 대왕참나무(H8.4×W5.2×R18) 16°C의 결과와는 다소 차이를 보여주었다. 이것은 Choi and Lee(2006)와 Lee and Ryu(2014)의 연구에서 평균복사온도 측정을 위해 흑구온도계를 사용함으로써 발생된 결과가 아닌가 생각해 본다. 흑구온도계는 순복사계(Net-radiometer)에 비해 정확성과 민감도가 심각하게 떨어지기 때문이다(Thorsson *et al.*, 2007).

인간 열환경지수에서는 수종에 따라 음지가 양지에 비해 평균 8.9~14.8°C PET(1.5~2.5 단계) 낮은 결과를 보였는데, Ju *et al.*(2004)의 엽면적 지수 4.0이상이었던 느티나무(H5.5×W7.0×R35, H12.0×W14.0×R50)의 1.34~1.52°C WBGT(1/3~3/4 단계) 저감 효과에 비해서는 더 높은 효과를 보인 반면에, Abreu-Harbach *et al.*(2015)의 단독수 12~16°C PET, 가로수 12.5~14.5°C PET 저감 효과에 비해서는 다소 낮은 결과를 보이는 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서 가로수가 여름철 인간 열환경지수(열쾌적성)에 미치는 영향을 분석하기 위해, 제주특별자치도를 대상으로 하여 2015년 여름철(7월, 8월) 낙엽활엽교목 2종과 상록활엽교목 3종 총 5종의 가로수를 각각 1일씩 5일간 수목 하부인 음지와 그 옆의 양지에서 기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구복사 에너지를 측정하여 비교 분석하였다.

기온, 상대습도, 풍속의 차이는 각각 평균 0.2~1.5°C, 0.9~5.3%, 0.1~0.5ms⁻¹로 미비하였으나, 평균복사온도는 양지가 평균 62.5°C, 음지가 평균 35.4°C로 27.1°C의 매우 큰 차이를 보여 주었다. 이는 인간 열환경지수(열쾌적성) 분석에서 평균복사온도가 매우 중요한 미기후 요소임을 보여 주었다. 인간 열환경지수인 PET와 UTCI 결과에서는 수목 하부의 음지가 오픈스페이스인 양지에 비해 PET에서는 평균 21.2~31.3%의 저감 비율을 보여 1.5~2.5단계의 열지각 저감 효과를 나타내었으며, UTCI에서는 평균 12.7~20.0%의 저감 비율을 보여 1~1.5단계의 열스트레스 저감 효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한,

낙엽활엽교목 2종과 상록활엽교목 3종의 수목하부인 음지와 주변지역의 양지를 비교하였을 때 차이 값이 상록활엽교목 3종이 PET에서 평균 5% 더 높게 나타나는 차이가 발생하였지만, 낙엽활엽교목에 속하는 느티나무는 지엽의 밀도가 높아 상록활엽교목 만큼의 열환경지수(열쾌적성) 개선 효과를 나타내었다. 이에 따라, 가로수의 열 저감 효과에서 지엽의 밀도와 평균복사온도가 인간 열환경지수(열쾌적성) 개선의 주요 영향임을 알 수 있었다.

본 연구는 가로수가 인간 열환경지수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연구가 이루어 졌지만, 가로수로 많이 이용되고 있는 낙엽활엽교목은 왕벚나무와 느티나무 2종 밖에 포함시키지 못하여, 향후 연구에서는 본 연구 방법을 이용하여 더 많은 수종에 대한 자료 구축이 이루어져야 할 것이다. 또한, 최대 열저감 효과를 알아보기 위해 여름철 맑은 날을 기준으로 측정하였으나, 측정장비 수와 맑은 날의 제한으로 좀 더 많은 자료 측정이 있었으면 더 명확한 결과를 보여 줄 수 있었을 것이다. 그렇지만, 본 연구의 결과는 시간에 따른 음지와 양지의 인간 열환경지수(PET, UTCI) 저감을 차이는 거의 없는 것으로 나타나 결과에 대한 신뢰도는 높다고 할 수 있을 것이다. 앞으로, 태양에너지 차감률뿐만 아니라, 하늘시계지수(sky view factor)도 고려한 사계절 추가 연구가 요망된다.

References

1. Abreu-Harbich, L., L. Labaki and A. Matzarakis(2015) Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning* 138: 99-109.
2. Ahn, T., J. Lee, Kim, B. Yoon, S. Son, Y. Choi, N. Lee, J. Lee and H. Kim(2013) An analysis of thermal comforts for pedestrians by WBGT measurement on the urban street greens. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 41(3): 22-30.
3. Choi, D. and B. Lee(2006) Analysis of passive cooling effect of the tree by field observations in the summer. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 26(4): 109-110.
4. Égerházi, L. A., A. Kovács and J. Unger(2013) Application of microclimate modeling and onsite survey in planning practice related to an urban micro-environment. *Advances in Meteorology* 2013, Article ID 251586, doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/251586>
5. Gál, T., M. Rzepa, B. Gromek and J. Unger(2007) Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *ACTA Climatologica et Chronologica, Universitatis Szegediensis, Tomus* 40-41: 17-26.
6. IPCC(2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. WMO, 7bis, Avenue de la Paix, 1211 Geneva2.
7. Ju, M., C. Lee and N. Ryu(2004) The effect of urban shade trees on the WBGT (Wet Bulb Globe Thermometer Index). *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 32(3): 51-59.
8. Jung, L., Y. Jin, Y. Jeun, K. Ko, H. Park and S. Park(2016) A case study of human thermal sensation (comfort) in plastic houses. *Journal of Environmental Science International* 25(8): 1115-1129.
9. Lee, C. and N. Ryu(2010) The influence of landscape pavements on the WBGT of outdoor spaces without ventilation or shade at summer midday. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 38(2): 1-8.
10. Lee, C. and N. Ryu(2012) The influence of ventilation and shade on the mean radiant temperature of summer outdoor. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(5): 100-108.
11. Lee, C. and N. Ryu(2013) The comparison of the ultra-violet radiation of summer outdoor screened by the landscaping shade facilities and tree. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 41(6): 20-28.
12. Lee, C. and N. Ryu(2014) The comparison of the solar radiation and the mean radiant temperature (MRT) urban the shade of landscaping trees in summertime. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 42(5): 22-30.
13. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan Model. *International Journal of Biometeorology* 54(2): 131-139.
14. Park, K., S. Lee, Y. Shim and H. Hwang(2011) Analysis on the mitigation effects of urban heat island through creation of water space-a case study of Yeol-Mae village Apt in Daejeon's Noeun District. *The International Journal of the Korean Institute of Ecological Architecture and Environment* 11(5): 13-18.
15. Park, S.(2011) *Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model*. Ph.D dissertation, University of Victoria, Victoria, B.C., Canada.
16. Park, S.(2012) Landscape planning and design methods with human thermal sensation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(1): 1-11.
17. Park, S.(2013) A way for creating human bioclimatic maps using human thermal sensation (comfort) and applying the maps to urban and landscape planning and design. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 41(1): 21-33.
18. Shahidan, M., M. Shariff, P. Jones, E. Salleh and A. Abdullah (2010) A comparison of *Mesua ferrea* L. and *Hura crepitans* L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort. *Landscape and Urban Planning* 97: 168-181.
19. Takács, Á., M. Kiss, A. Hof, E. Tanács, Á. Gulyas and N. Kántor (2016) Microclimate modification by urban shade trees: An integrated approach to aid ecosystem service based decision making. *Procedia Environmental Sciences* 32: 97-109.
20. Thorsson, S., F. Lindberg, I. Eliasson and B. Holmer(2007) Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27: 1983-1993.
21. Yoon, Y.(2003) Temperature lowering effects varied by the arrangement and types of vegetation. *Journal of Korean Turfgrass Science* 17(4): 165-172.
22. Yoon, Y., S. Park, W. Kim and J. Kim(2014) Analyses on comparison of UTCI, PMV, WBGT between playground and green space in school. *Journal of Korean Environment and Ecology* 28(1): 80-89.

Received : 28 July, 2017

Revised : 16 August, 2017 (1st)

25 October, 2017 (2nd)

Accepted : 25 October, 2017

3인익명 심사필