



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

여름철 인간 열환경지수에 미치는
가로수와 단독수의 영향 분석

제주대학교 대학원

원예학과

조상만

2018년 2월

여름철 인간 열환경지수에 미치는 가로수와 단독수의 영향 분석

지도교수 박 수 국

조 상 만

이 논문을 농학 석사학위 논문으로 제출함.

2017년 12월

조상만의 농학 석사학위 논문을 인준함

| | | | |
|-------|---|---|---|
| 심사위원장 | 강 | 훈 | 이 |
| 위 | 원 | 관 | 상 |
| 위 | 원 | 수 | 국 |

제주대학교 대학원

2017년 12월

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

Sangman Jo

(Supervised by professor Sookuk Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science in Agriculture

2017. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Horticultural Science

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

| | |
|--------------------------|----|
| 목 차 | i |
| List of Tables | ii |
| List of Figures | iv |
| Abstract | vi |
| | |
| I. 서언 | 1 |
| 1. 인간 에너지 균형 모델 | 3 |
| 2. 인간 열환경지수 | 5 |
| II. 재료 및 방법 | 6 |
| 1. 연구대상지 | 6 |
| 2. 미기후 요소 측정 | 11 |
| 3. 평균복사온도 분석 방법 | 13 |
| 4. 인간 열환경지수 분석 방법 | 15 |
| III. 결과 및 고찰 | 17 |
| 1. 미기후요소 | 17 |
| 1) 가로수 | 17 |
| 2) 단독수 | 21 |
| 2. 인간 열환경지수 | 24 |
| 1) 가로수 | 24 |
| 2) 단독수 | 28 |
| 3. 인간 열환경지수 민감도 조사 | 32 |
| 4. 기존의 연구들과의 비교 | 35 |
| IV. 결론 | 37 |
| V. 초록 | 39 |
| 인용문헌 | 40 |

List of Tables

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 1. Characteristics for street and single tree species | 10 |
| Table 2. Instruments for microclimatic data measurement | 12 |
| Table 3. The levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI) | 16 |
| Table 4. Mean±standard deviation (maximum) values of shading effects of street 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 | 20 |
| Table 5. ANOVA results of shading effects of street tree species for T_{mrt} | 20 |
| Table 6. Mean±standard deviation (maximum) values of shading effects of single 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 | 23 |
| Table 7. ANOVA results of shading effects of single tree species for T_{mrt} | 23 |
| Table 8. ANOVA results of shading effects of street tree species for PET | 27 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 9. ANOVA results of shading effects of street tree species for UTCI | 27 |
| Table 10. ANOVA results of shading effects of single tree species for PET | 31 |
| Table 11. ANOVA results of shading effects of single tree species for UTCI | 31 |

List of Figures

| | | |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1. | Energy transfers between a human body and its surrounding environment | 4 |
| Fig. 2. | Study sites of street and single trees | 7 |
| Fig. 3. | Fisheye lens photographs and pictures of street trees. 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 factors (SVFs) of the photographs were calculated with BMSky-view | 8 |
| Fig. 4. | Fisheye lens photographs and pictures of single trees. 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 factors (SVFs) of the photographs were calculated with BMSky-view | 9 |
| Fig. 5. | Instruments setup for microclimatic data measurement | 12 |
| Fig. 6. | RayMan Pro. Version 2.2 | 15 |
| Fig. 7. | Microclimatic factors of street tree species | 19 |
| Fig. 8. | Microclimatic factors of single tree species | 22 |
| Fig. 9. | PET and UTCI values and their reduction ratios between sunny and shaded locations of street tree species | 26 |

Fig. 10. PET and UTCI values and their reduction ratios between sunny and shaded locations of single tree species 30

Fig. 11. Sensitivity tests of microclimatic factors in human thermal sensation: a) air temperature, b) relative humidity, c) wind speed and d) mean radiant temperature 34

ABSTRACT

In order to analyze the effect of street trees and single 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 and one deciduous broadleaf, two broadleaf and one conifer evergreen species of single 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 for street trees and 0.1–0.5 °C, 0.5–1.8 % and 0.0–0.7 ms⁻¹ for single trees, respectively. However, the mean difference in the mean radiant temperature was great: 27.1 °C for street trees and 17.8 °C for single trees. 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 for street trees and 14.8–20.5 % for single trees compared with the sunny location, which are equivalent to 1.5–2.5 levels of thermal perception for street trees and 1.0–1.5 levels for single trees. Also, 12.7–20.0 % for street trees and 9.2–12.5 % for single trees in the UTCI were reduced by the trees' shadows, which is equivalent to 1.0–1.5 levels of heat stress for street trees and 0.6–0.8 levels for single trees. In addition, although the broadleaf evergreen trees in the street 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. In the single trees, the conifer evergreen tree had 3.6% and 1.9 % greater mean deduction in PET than those of the deciduous

broadleaf tree and the broadleaf evergreen trees, respectively. Moreover, one of the broadleaf evergreen trees, *Machilus thunbergii* which had a dense crown, produced the same thermal reduction effect as the conifer evergreen tree. Therefore, the mean radiant temperature and the density of the crown (branches and leaves) were the main influences in thermal modification by these street and single trees in summer.

I. 서 언

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 조경소재에 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 습흑구온도(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 열저감 효과에 관한 연구(Choi and Lee, 2006), 하절기 수형이 서로 다른 3종의 조경용 녹음수(배롱나무, 대왕참나무, 참느릅나무) 수관 하부와 노출된 상태에서 일사 및 온도분포 특성을 비교하기 위하여 인접한 잔디광장을 대조구로 설정하여 일사량과 건구·흑구온도를 바탕으로 한 평균복사온도를 비교한 연구(Lee and Ryu, 2014)가 있었다. 가로수의 열저감 효과에 대한 연구들은, 수종의 선택뿐만 아니라 식재방식에 따라서 열환경 개선 효과가 달라진다는 연구(Park, 2013)와 도심 가로 녹음수의 WBGT 측정과 보행자 행태 및 설문조사를 통한 보

행자 열쾌적성 효과를 분석한 연구(Ahn *et al.*, 2013)가 있었으나, Ahn *et al.*(2013)의 연구는 건구·습구·흑구온도 측정 시 태양직사광선만 막아줄 수 있는 삼각 지붕형태의 가림막만을 이용함으로써 지표면에서 유입되는 태양반사광선과 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·지구복사에너지량의 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 가로수와 단독수로 많이 사용되는 수목의 성상(낙엽활엽교목, 상록활엽교목, 상록침엽교목)에 따라 수목 하부(음지)와 그 옆의 오픈스페이스 지점(양지)에서 동시에 측정된 미기후 자료를 통해 여름철 가로수와 단독수에 대한 인간 열환경지수의 개선 정도를 비교분석하여 보았다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 추후 가로수와 단독수 선정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

1. 인간 에너지 균형 모델

인간 에너지 균형 모델은 ‘외부로 부터 들어오는 에너지양 - 인체에서 나가는 에너지양 = 0’이라는 기본 에너지 균형 모델을 기반으로 하여, 인간이 주변 환경과 교환하는 에너지양을 정량적으로 계산하는 방식이다. 인간 에너지 균형 모델식은 Eq. 1과 같다.

$$M + R + L + C + E + C_r + E_r + H = S \quad (\text{Eq. 1})$$

위 식에서 M 은 신진대사에너지(metabolic energy)를 뜻하고, R 은 태양 복사 에너지(solar or shortwave radiation)를 뜻하며, 태양 직사광선(direct beam solar radiation, K_b), 건축물 또는 수목에 의해 가려지지 않은 하늘이 보이는 공간(sky view factor, SVF)에서 오는 분사광선(diffuse beam solar radiation, K_d) 그리고 건축물(solar radiation reflected by buildings, K_{ro}), 수목(solar radiation reflected by trees, K_{rveg}), 지표면(solar radiation by the ground, K_{rg})에서 반사되어 오는 반사광선(reflected solar radiation, K_r)으로 구성된다. L 은 지구 복사 에너지(terrestrial or longwave radiation)를 뜻하며, 하늘 공간(longwave radiation from the sky, L_a), 건축물(longwave radiation from buildings, L_o), 수목(longwave radiation from trees, L_{veg}), 지표면(longwave radiation from the ground, L_g)에서 방출되어 인체에 미치는 복사에너지와 인체에서 주변 환경으로 방출되는 복사에너지(longwave radiation from a human body surface, L_b)로 구성된다. C 는 인체 피부와 주변 공기의 온도 차이에 의해 발생하는 현열(sensible heat flux density)이며, E 는 인체 피부와 주변 공기의 습도 차이에 의해 발생하는 잠열(latent heat flux density)을 뜻한다. C_r 과 E_r 은 호흡하는 동안 발생하는 현열과 잠열을 뜻한다. H 는 전도열(conductive heat flux density)로 신체의 일부가 직접 다른 물체에 닿아서 두 표면의 온도 차이로 인해 발생하는 에너지 전달이다. S 는 인체에 남은 에너지양을 말하며, 그 값이 양(+)의 값이면 인체가 방출한 에너지양보다 들어오는 양이 더 많다는 것을 의미하며 따뜻함, 더움, 매우 더움 등의 열환경지수를 나타내고, 음(-)의 값이면 인체가 방출한 에너지양보다 나

가는 양이 더 많다는 것을 의미하며 서늘함, 추움, 매우 추움 등의 열환경지수를 나타낸다(Figure 1; Park, 2012).

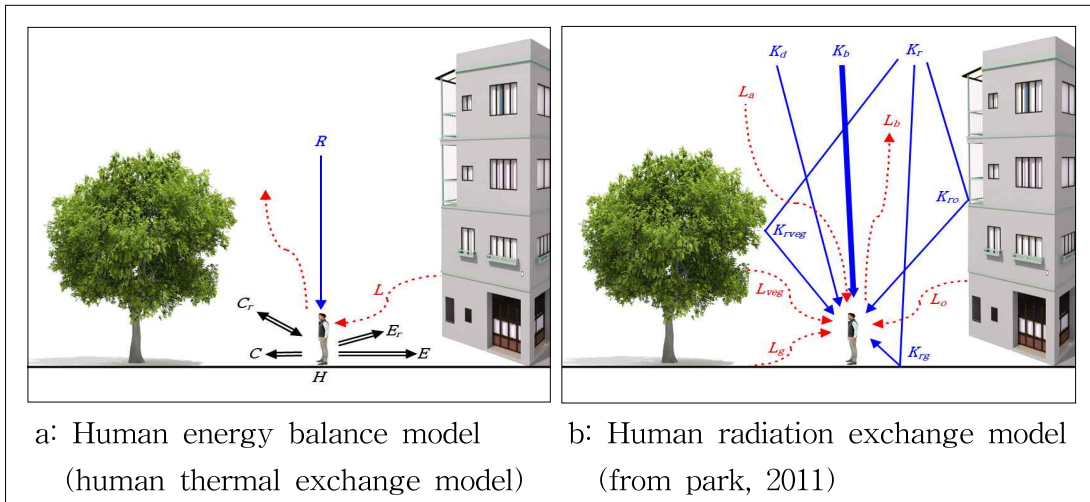


Figure 1. Energy transfers between a human body and its surrounding environment

2. 인간 열환경지수

인간 열환경지수는 인간 에너지 균형 모델(human energy balance model)을 기반으로 인체를 둘러싼 환경으로부터 인체로 흡수되는 에너지양과 인체로부터 주변 환경으로 방출되는 에너지양을 정량적으로 계산하여 열생리학적(thermophysiological)으로 인간이 느끼는 반응을 분석하는 것이다(Park, 2012). 국제적으로 활발하게 사용되고 있는 모델로는 실내용으로 predicted mean vote (PMV; Fanger, 1972), 실외용으로 독일에서 개발된 PET(Matzarakis *et al.*, 1999)와 국제생명기상학회(International Society of Biometeorology)가 개발한 UTCI가 있다. 이 모델들은 미기후요소들(기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도)을 모두 이용하여 실내·외 공간에서 인간이 느끼는 열환경을 분석하는데 활발하게 이용되고 있다. 특히, 평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mrt})는 인체에 흡수되는 태양 및 지구복사에너지양을 이용하여 계산하는 것으로, 인체를 둘러싸고 있는 환경을 구(sphere)의 형태로 가정하여 구의 모든 표면에서 동일한 복사에너지를 인체로 방출하는 것으로 생각하였을 때의 가상의 구의 표면온도를 말한다.["The mean radiant temperature is defined as the uniform temperature of an imaginary enclosure in which the radiant heat transfer from the human body is equal to the radiant heat transfer in the actual non-uniform enclosure" from Fanger (1972)].

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

여름철 인간 열환경지수에 미치는 가로수와 단독수의 영향을 분석하기 위해 제주특별자치도(Jeju island 33°16' -34°00' N, 126°08' -126°58' E의 범위에 위치하며, 면적 1,848.4km², 해안선 길이 545.22km; 제주도청, <http://www.jeju.go.kr>) 안에서 가장 많이 사용되는 가로수 중 낙엽활엽교목 2종(왕벚나무, 느티나무), 상록활엽교목 3종(구실잣밤나무, 담팔수, 먼나무)을 선정하였다(Figure 2a 참조). 제주대학교 본관 앞의 왕벚나무(*Prunus yedoensis*, H6.1×W8.5×B31, 7m 식재간격), 연삼로 537에 위치한 느티나무(*Zelkova serrata*, H6.4×W5.7×R25, 12m 식재간격), 구산로 63 제주지방해양경비안전본부 앞의 구실잣밤나무(*Catanopsis sieboldii*, H6.9×W9.1×R22, 8m 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 대상지로 하였다(Figure 3 and Table 1 참조).

단독수는 낙엽활엽교목 1종(왕벚나무), 상록활엽교목 2종(구실잣밤나무, 후박나무)과 상록침엽교목 1종(곰솔)을 선정하였다(Figure 2b 참조). 제주시 한라산 관음사 야영장의 왕벚나무(H8.5×W11.0×B37), 서귀포시 오설록 녹차밭의 구실잣밤나무(H8.7×W12.9×R54)와 후박나무(*Machilus thunbergii*, H5.8×W8.7×R27), 제주시 한북로 18의 곰솔(*Pinus thunbergii*, H9.2×W13.0×R46)이 식재되어 있는 장소를 연구 대상지로 하였다(Figure 4 and Table 1 참조).

주변의 영향을 배제하기 위하여, 가로수 길과 단독수 식재지 중 타 수목의 영향이 없고 건물의 영향이 거의 없는 지점을 골라 미기후자료를 측정하였다. 제주특별자치도의 북제주(제주시) 지방의 연평균 기온은 15.8℃, 1월 평균기온이 5.7℃, 8월 평균기온이 26.8℃인데 비하여 남제주(서귀포시) 지방의 연평균 기온은 16.6℃, 1월 평균기온이 6.8℃, 8월 평균기온이 27.1℃이다(기상청 30년 평년값자

료; http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_30years.jsp). 연강수량은 1,497mm (제주시) - 1,923mm(서귀포시)로 우리나라 최다우 지역에 해당한다.

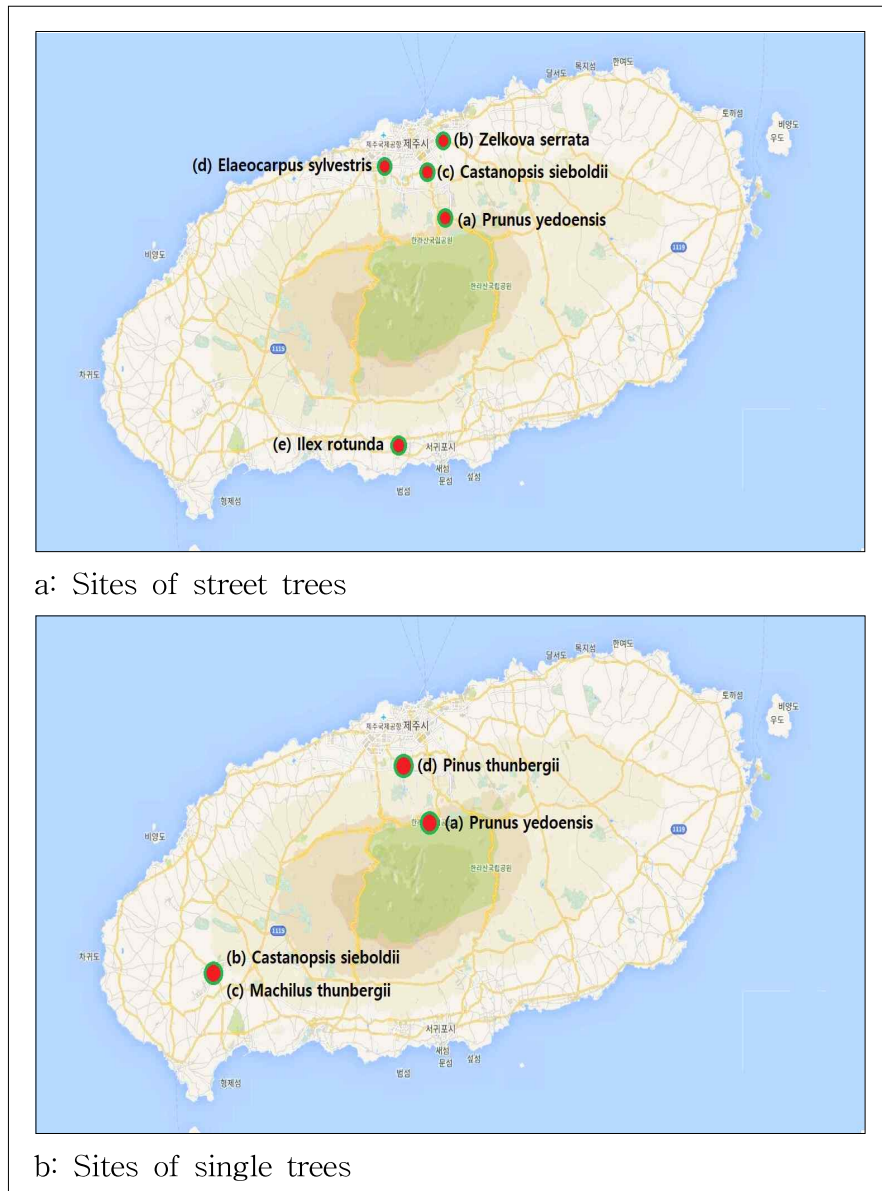


Figure 2. Study sites of street and single trees

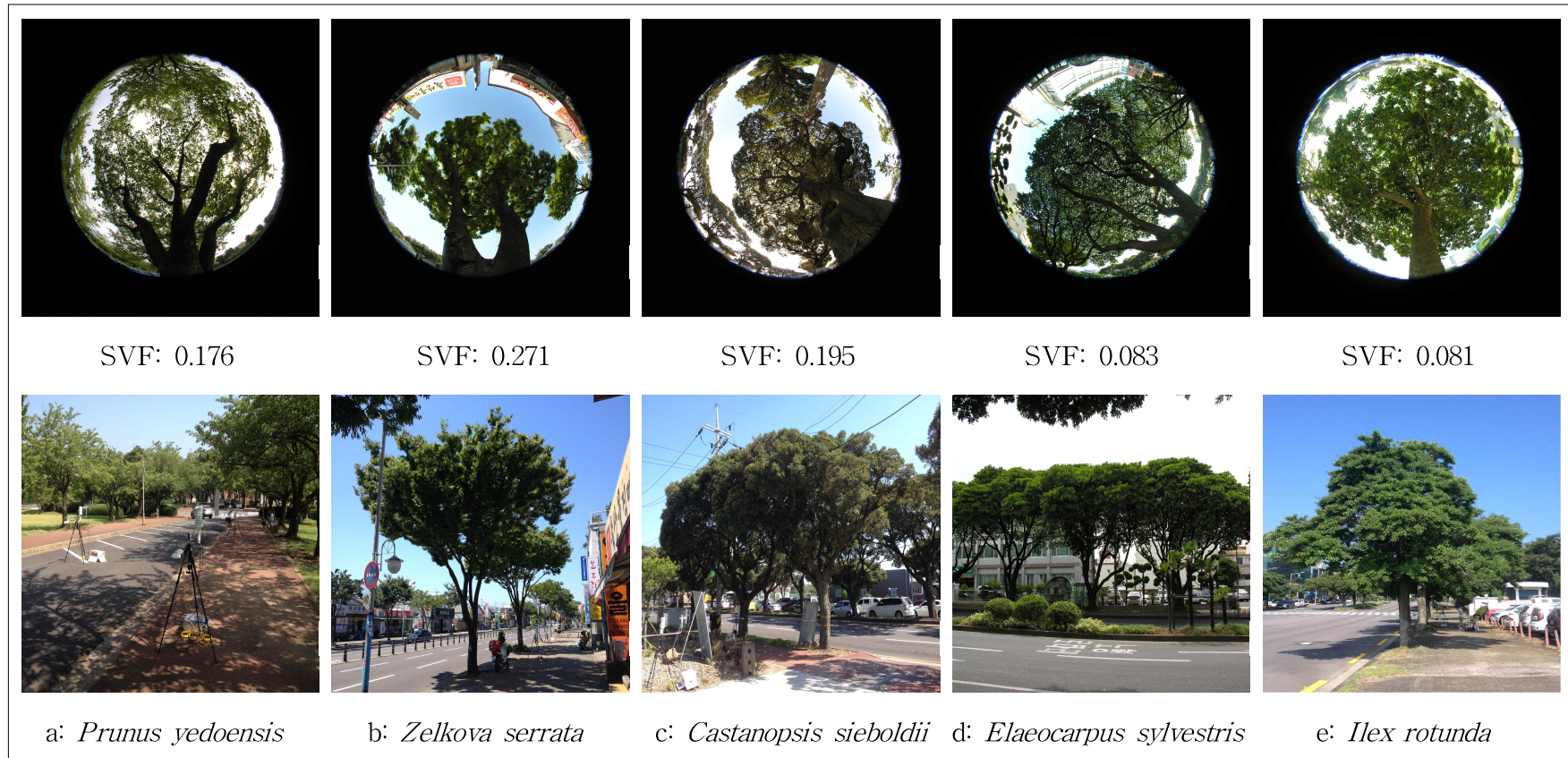


Figure 3. Fisheye lens photographs and pictures of street trees. Fisheye lens photographs were taken using Nikon Coolpix 8800 camera with Nikon FC-E9 Fisheye converter lens and Nikon UR-E18 converter adapter, and sky view factors (SVFs) of the photographs were calculated with BMSky-view (Gál *et al.*, 2007)

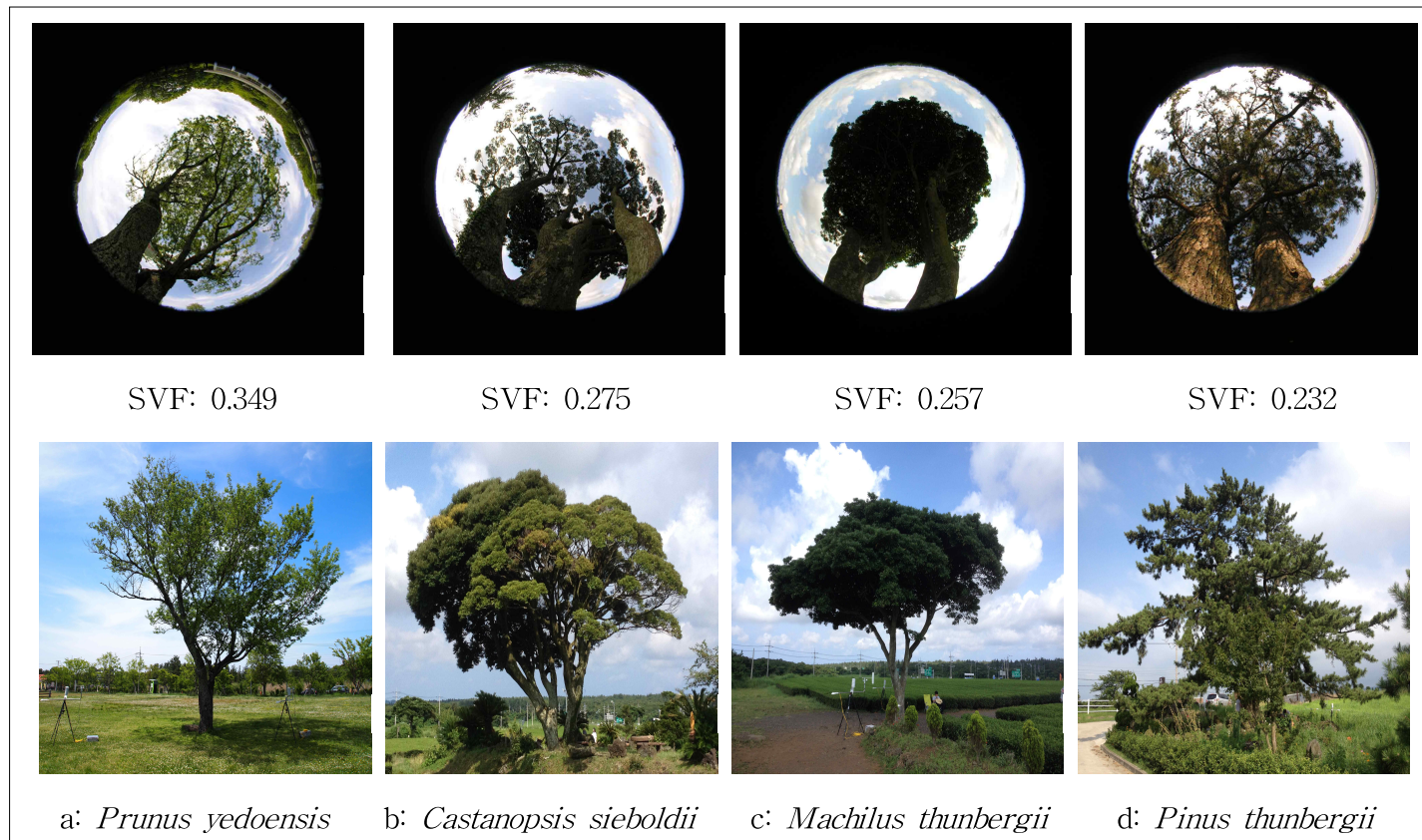


Figure 4. Fisheye lens photographs and pictures of single trees. Fisheye lens photographs were taken using Nikon Coolpix 8800 camera with Nikon FC-E9 Fisheye converter lens and Nikon UR-E18 converter adapter, and sky view factors (SVFs) of the photographs were calculated with BMSky-view (Gál *et al.*, 2007)

Table 1. Characteristics for street and single tree species

| Species | Street tree species | | | | | Single tree species | | | |
|----------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | <i>Prunus yedoensis</i> | <i>Zelkova serrata</i> | <i>Catanopsis sieboldii</i> | <i>Elaeocarpus sylvestris</i> | <i>Ilex rotunda</i> | <i>Prunus yedoensis</i> | <i>Catanopsis sieboldii</i> | <i>Machilus thunbergii</i> | <i>Pinus thunbergii</i> |
| 수고(m) | 6.1 | 6.4 | 6.9 | 9.6 | 5.6 | 8.5 | 8.7 | 5.8 | 9.2 |
| 지하고(m) | 2.3 | 2.3 | 3.2 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 3.5 | 3.0 | 2.4 |
| 수관폭(m) | 8.5 | 5.7 | 9.1 | 9.0 | 7.4 | 11.0 | 12.9 | 8.7 | 13.0 |
| 근원직경(cm) | - | 25 | 22 | 28 | 21 | - | 54 | 27 | 46 |
| 흉고직경(cm) | 31 | - | - | - | - | 37 | - | - | - |
| 식재간격(m) | 7 | 12 | 8 | 7-8 | 7 | - | - | - | - |

2. 미기후 요소 측정

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

단독수에서는 맑은 날을 기준으로 총 4종의 단독수를 각각 1일 동안 09:00-17:00동안 이루어 졌으나, 왕벚나무는 2016년 7월 23일 09:00-12:38, 구실잣밤나무와 후박나무는 7월 26일 09:00-11:48과 14:37-17:00, 곰솔은 7월 24일 09:00-17:00까지의 자료가 비교 분석되었다.

미기후 측정요소인 기온(air temperature, T_a)과 상대습도(relative humidity, RH)는 HMP155A(Campbell Scientific Inc.; <http://campbellsci.com>), 풍속(wind speed, u) 및 풍향은 Met One 034B-L Windset(Campbell Scientific Inc.)을 이용하여 신체의 가슴높이인 지표면으로부터 1.2m 높이에서 매 1분 단위로 측정되었다(Table 2 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 가로수에서 해당 수목의 하부 음지 지점 2곳과 해당 수목 주변의 양지인 오픈스페이스 지점 1곳(Figure 5a 참조), 단독수에서 해당 수목의 하부 음지 지점 1곳과 해당 수목 주변의 양지인 오픈스페이스 지점 1곳에 설치하여 실시간으로 관측하였다(Figure 5b 참조).

Table 2. Instruments for microclimatic data measurement

| Data | Instrument | | |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| | Name | Accuracy | Manufacture |
| Radiation | CNR4 Net Radiometer | $\leq 1\%$ ($-40-80^{\circ}\text{C}$) | Kipp & Zonen Inc. |
| Air temp. and Relative humidity | HMP155A | · Air temp.: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ($-80-60^{\circ}\text{C}$) · Relative humidity: 2% (0-90%) 3% (90-100%) | Campbell Scientific Inc. |
| Wind speed and direction | Met one 034B-L Windset | · Wind speed: $\pm 0.1 \text{ ms}^{-1}$ ($\leq 10.1 \text{ ms}^{-1}$) $\pm 1.1\%$ ($\geq 10.1 \text{ ms}^{-1}$) · Wind direction: $\pm 4^{\circ}$ | |
| Datalogger | CR1000 | $\pm 0.06\%$ ($0-40^{\circ}\text{C}$) | |

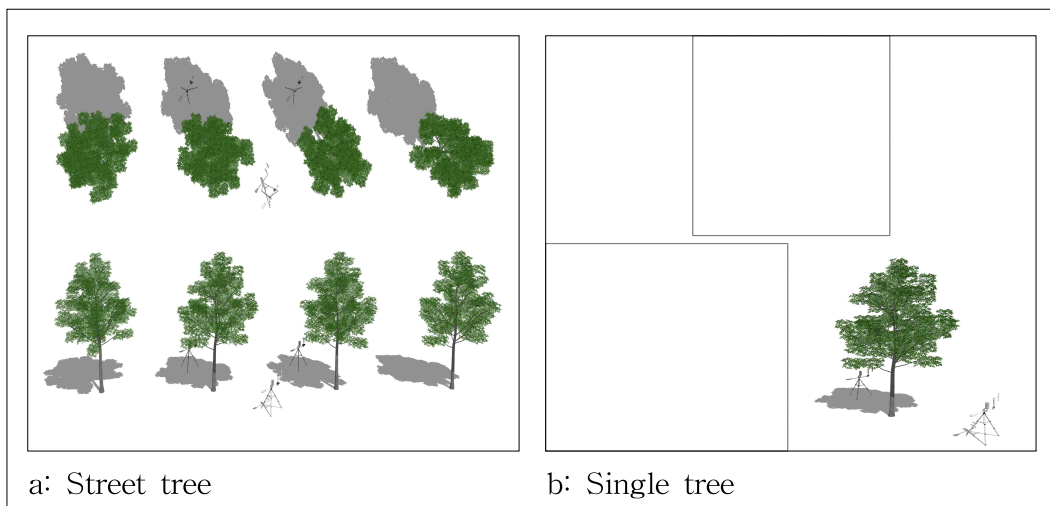


Figure 5. Instruments setup for microclimatic data measurement

3. 평균복사온도 분석 방법

평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mrt})는 측정된 태양 및 지구복사에너지를 Park(2011)의 방법을 이용하여 양지의 경우(Eq. 2)와 음지의 경우($f_p \cdot K_b^+ = 0$, Eq. 3)로 나누어 계산하였다. T_a , RH , u , T_{mrt} 는 30분 평균값을 Microsoft Office Excel 2016(<https://www.office.com>)을 이용하여 비교분석하였다.

양지의 경우 :

$$T_{mrt} = \left[\frac{(f_p \cdot K_b^+ \cdot a_k + 0.5(K_d + K_r)a_k + 0.5 \cdot \epsilon_p(L \downarrow + L \uparrow))}{\epsilon_p \sigma} \right]^{0.25} - 273.15^\circ\text{C} \quad (\text{Eq. 2})$$

음지의 경우 :

$$T_{mrt} = \left[\frac{0.5(K_d + K_r)a_k + 0.5 \cdot \epsilon_p(L \downarrow + L \uparrow)}{\epsilon_p \sigma} \right]^{0.25} - 273.15^\circ\text{C} \quad (\text{Eq. 3})$$

σ 은 Stefan_bolzman 상수($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)를 뜻하며, f_p 는 서있는 자세와 걷는 자세를 결합한 공식으로 태양의 위치에 따라 직사광선이 미치는 인체 표면적(projected area factor)으로, Park(2011)의 방법을 이용하여 계산한다(Eq. 4). K_b 는 수평면으로 들어오는 직사광선(direct beam radiation), K_b^+ 는 인체표면에 수직으로 들어오는 직사광선을 뜻하며, $K_b/\sin(\text{solar elevation}, \beta)$ 의 값으로 β 은 한국천문연구원 천문우주지식정보(<https://astro.kasi.re.kr:444/index>)의 태양 고도/방위각계산에서 해당수목의 미기후요소 측정 날짜를 입력하여 얻은 검색결과를 이용하여 연구시작 시간부터 한 시간 마다 고도의 값을 입력하여 계산하였다. a_k 는 태양복사에너지 인체흡수율(0.7)을 뜻하며. K_d 는 건축물 또는 수목에 의해 가려지지 않은 하늘이 보이는 공간에서 오는 분사광선(diffuse beam solar radiation)을 뜻하고, 양지 지점의 K_d 의 값을 구하기 위해서 연구시작 시간부터 30분마다 1분씩 신체의 주먹을 이용하여 하늘을 향해 있는 CNR4의 pyranometer로 들어오는 태양직사광선을 가려주었다. K_r 는 건축물(K_{ro}), 수목(K_{rveg}), 지표면(K_{rg})에서 반사되어 오는 반사 광선으로 구성되어 있다. ϵ_p 는 지구복사에너지 방사율(보통

0.97)을 뜻한다. $L \downarrow$ 은 하늘공간(L_a), 건축물(L_o), 수목(L_{veg})에서 방출되어 인체에 미치는 지구복사에너지를 뜻하며, $L \uparrow$ 은 지표면(L_g)에서 방출되어 인체에 미치는 지구복사에너지를 뜻한다. 여기에서 0.5는 신체의 표면적 전체를 1.0으로 보았을 때, 빛의 방향성으로 인해 인체에 영향을 미치는 복사에너지의 양의 면적 비율을 의미한다.

$$f_p = 3.34 \cdot 10^{-7} \cdot \beta^3 - 6.6 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2 + 8.42 \cdot 10^{-4} \cdot \beta + 0.297 \quad (\text{Eq. 4})$$

4. 인간 열환경지수 분석 방법

측정된 미기후 자료를 이용하여 인간 열환경지수인 PET와 UTCI를 RayMan Pro. Version 2.2(<http://www.urbanclimate.net/rayman>; Figure 6 참조)를 이용하여 계산하였다. PET와 UTCI 계산을 위해 필요한 입력 자료는 T_a , RH , u , T_{mrt} 이다.

계산된 가로수와 단독수의 PET와 UTCI의 평균, 표준편차, 최대값과 저감비율 등을 구하기 위해 Microsoft Office Excel 2016을 이용하여 계산하였다.

PET와 UTCI에서의 가로수와 단독수의 수종별 유의성 수준을 계산하기 위해 통계 프로그램인 SPSS Statistics Version 20(<https://www.ibm.com/spss>)을 이용하여 계산하였다. PET와 UTCI의 열환경지수 기준은 Table 3과 같다.

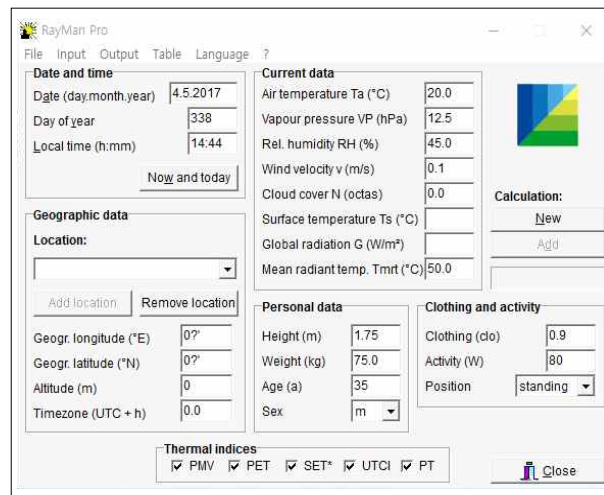


Figure 6. RayMan Pro. Version 2.2 (Matzarakis *et al.*, 2010)

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

| Thermal perception | PET (°C) | UTCI (°C) | 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 |

III. 결과 및 고찰

1. 미기후 요소

1) 가로수

미기후자료 측정 결과, 5종의 가로수에서 T_a 은 구실잣밤나무에서만 수목주변의 양지가 수목하부의 음지보다 평균 1.5°C (최대 3.1°C) 높게 나타났고, 다른 가로수들은 느티나무가 평균 0.7°C 로 조금 높게 나타났고, 왕벚나무·담팔수·먼나무는 평균 $0.2\text{-}0.3^{\circ}\text{C}$ 로 양지와 음지간의 T_a 차이는 거의 없는 것으로 나타났다(Figure 7 and Table 4 참조). 구실잣밤나무, 느티나무, 담팔수가 있는 도로는 왕복 6차선으로 교통량이 많은 도로로 양지와 음지의 거리가 가깝게 위치해 있어 도로의 폭이나 교통량이 영향을 미쳤다고는 보기 어렵다. 다만, 구실잣밤나무에서 조금 큰 차이를 나타낸 이유는 양지의 지점이 수목에서 도로 쪽으로 5m 안쪽에 위치한 자갈로 피복된 주차장에 위치되어 피복재료가 영향을 주었으리라 생각된다.

RH 도 평균 $0.9\text{-}5.3\%$ (최대 $4.2\text{-}12.2\%$)로 차이가 작게 나타났다. 구실잣밤나무에서 음지가 평균 5.3% 로 가장 크게 나타났고, 다른 가로수들은 평균 $0.9\text{-}2.8\%$ 로 차이가 미미하였다(Figure 7 and Table 4 참조). 그러나, 구실잣밤나무에서는 양지와 음지의 T_a 차이가 다른 가로수에 비해 조금 크게 나타났듯이 RH 에서도 차이가 다른 가로수에 비해서 조금 더 크게 났다. 절대습도(absolute humidity, Eq. 5)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 양지와 음지에서의 습도의 차이는 없다고 하겠다.

u 은 양지와 음지 지점의 차이가 평균 $0.1\text{-}0.5\text{ ms}^{-1}$ 으로 차이가 크지는 않는 것으로 관측되었다. 이것도 왕벚나무와 먼나무에서 차이가 평균 0.4 ms^{-1} , 담팔수에서 평균 0.5 ms^{-1} 로 낙엽활엽교목과 상록활엽교목의 차이는 나타나지 않았다(Figure 7 and Table 4 참조). 또한, 풍향에 따라서 측정장비에서 관측된 u 은 달

라질 수 있어, 양지에서 u 이 더 낮은 경우도 발생하였다. 그 차이들은 수목에 의한 u 저감현상이 발생한다는 것을 잘 보여주었다고 하겠다.

반면에, T_{mrt} 는 양지와 음지에서 확연한 차이를 나타내었다. 측정한 5종의 가로수에서 태양복사에너지의 영향을 직접적으로 받는 양지에서는 평균 62.5℃를 나타냈고, 음지에서는 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(Figure 7 and Table 4 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.

SPSS의 Duncan 방식의 ANOVA분석 결과 T_{mrt} 는 구실잣밤나무(47.0%)>담팔수(45.4%)>먼나무(44.5%)>느티나무(43.1%)>왕벚나무(36.3%)순으로 95% 유의수준에서 복사에너지 저감비율에 대한 유의성을 나타내었다(Table 5 참조).

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 3b 참조). 시간대별 T_{mrt} 의 차이는 모든 가로수에서 일정 비율을 유지하는 것으로 나타났다(Figure 7 참조).

$$\text{Absolute humidity(\%)} = \left\{ 0.611 \cdot \text{EXP} \left(\frac{17.502 \cdot T_a}{T_a + 240.97} \right) 100 \right\} / (273.15 + T_a) 2.16679 \quad (\text{Eq. 5})$$

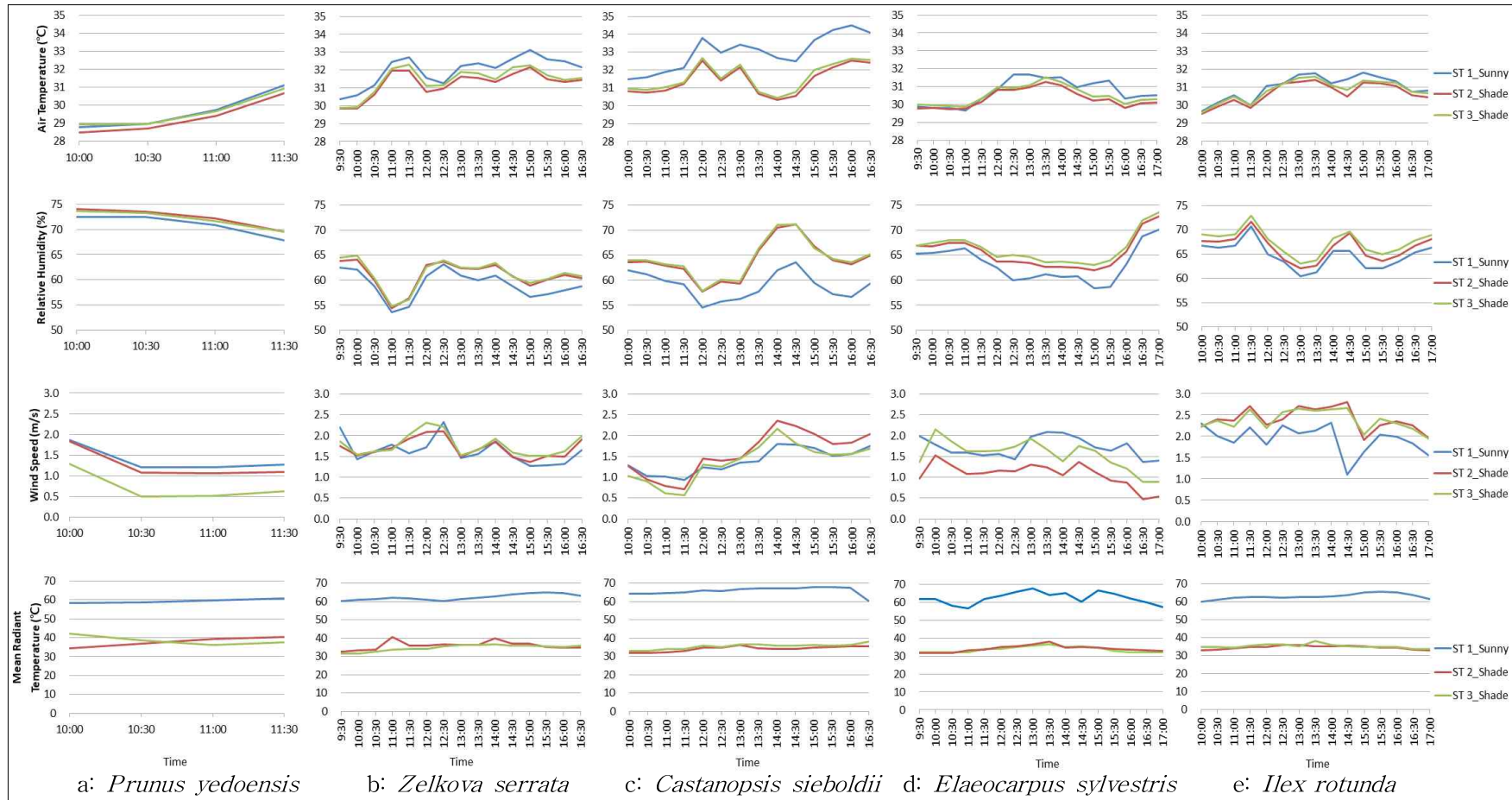


Figure 7. Microclimatic factors of street tree species

Table 4. Mean±standard deviation (maximum) values of shading effects of street 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>Catanopsis 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) |

Table 5. ANOVA results of shading effects of street tree species for T_{mrt}

| | N | Subset for alpha=0.05 | | | | |
|-------------------------------|-----|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 138 | 36.270 | | | | |
| <i>Zelkova serrata</i> | 431 | | 43.097 | | | |
| <i>Ilex rotunda</i> | 445 | | | 44.547 | | |
| <i>Elaeocarpus sylvestris</i> | 451 | | | | 45.423 | |
| <i>Catanopsis sieboldii</i> | 418 | | | | | 46.977 |
| Sig. | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

2) 단독수

미기후자료 측정결과, 4종의 단독수에서 T_a 는 구실잣밤나무에서만 수목주변의 양지가 수목하부의 음지보다 평균 0.5°C (최대 1.6°C) 높게 나타났고, 왕벚나무·후박나무·곰솔은 평균 0.1°C 로 양지와 음지간의 T_a 차이는 거의 없는 것으로 나타났다(Figure 8 and Table 6 참조).

RH 도 평균 $0.5\text{--}1.8\%$ (최대 $1.8\text{--}7.2\%$)로 차이가 적게 나타났다. 구실잣밤나무와 곰솔에서 음지가 각각 평균 1.7% , 1.8% 로 가장 크게 나타났고, 다른 가로수들은 평균 $0.5\text{--}0.7\%$ 로 차이가 미미하였다(Figure 8 and Table 6 참조).

u 는 양지와 음지지점의 차이가 평균 $0.0\text{--}0.7\text{ ms}^{-1}$ 으로 차이가 크지는 않은 것으로 관측되었다. 이것도 곰솔에서 차이가 평균 0.7 ms^{-1} 으로 가장 크게 나타났고, 다른 수목들에서는 평균 $0.0\text{--}0.3\text{ ms}^{-1}$ 으로 미미한 차이만이 관측되었다(Figure 8 and Table 6 참조).

반면에, T_{mrt} 는 양지와 음지에서 확연한 차이를 나타내었다. 측정한 4종의 단독수에서 태양복사에너지의 영향을 직접적으로 받는 양지에서는 평균 56.9°C 를 나타냈고, 음지에서는 평균 39.1°C 로 두 지점 간 평균 17.8°C 의 큰 차이를 보였다. 수종별 차이를 보면, 낙엽활엽교목인 왕벚나무(평균 16.5°C)와 상록활엽교목인 구실잣밤나무(평균 15.3°C), 후박나무(평균 19.9°C)가 상록침엽교목인 곰솔(평균 21.8°C)에 비해 작은 차이를 보였다(Figure 8 and Table 6 참조). 비율적으로도 왕벚나무(평균 29.5%), 구실잣밤나무(평균 25.4%), 후박나무(평균 33.1%), 곰솔(평균 38.4%)로 상록침엽교목이 낙엽활엽교목과 상록활엽교목에 비해 복사에너지 차감효과가 더 높은 것을 알 수 있었다.

SPSS의 Duncan 방식의 ANOVA분석 결과 T_{mrt} 는 곰솔(38.4%)>후박나무(33.1%)>왕벚나무(29.7%)>구실잣밤나무(25.4%)순으로 95% 유의수준에서 복사에너지 저감비율에 대한 유의성을 나타내었다(Table 7 참조). 시간대별 T_{mrt} 의 차이는 모든 단독수에서 일정 비율을 유지하는 것으로 나타났다(Figure 8 참조).

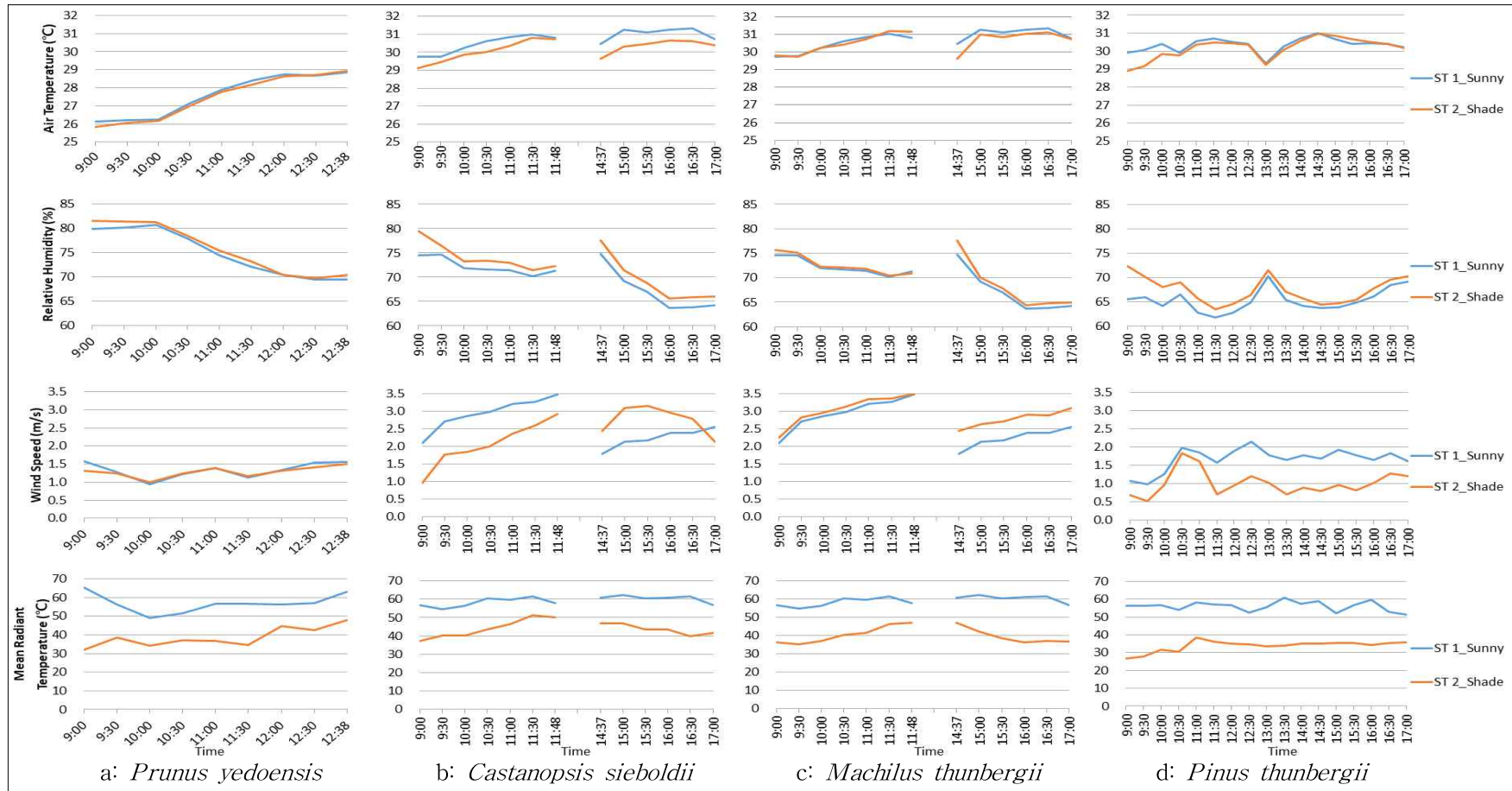


Figure 8. Microclimatic factors of single tree species

Table 6. Mean±standard deviation (maximum) values of shading effects of single 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> | 0.1±0.2 (0.6) | -0.7±1.6 (4.7) | 0.0±0.2 (0.6) | 16.5±7.0 (33.5) | 29.5±11.0 (51.3) | 7.3±3.3 (15.9) | 19.0±7.7 (36.4) | 4.1±1.8 (8.2) | 11.1±4.7 (21.7) |
| <i>Catanopsis sieboldii</i> | 0.5±0.4 (1.6) | -1.7±1.6 (2.6) | 0.2±1.0 (2.3) | 15.3±5.8 (26.6) | 25.4±8.9 (40.0) | 6.0±2.9 (12.9) | 14.8±6.6 (27.7) | 3.6±2.1 (8.1) | 9.2±5.2 (20.0) |
| <i>Machilus thunbergii</i> | 0.1±0.3 (0.6) | -0.5±0.8 (1.8) | 0.3±0.3 (0.8) | 19.9±5.5 (29.4) | 33.1±7.8 (44.2) | 7.6±2.4 (12.2) | 18.9±5.3 (27.6) | 4.8±1.6 (8.1) | 12.5±3.8 (20.0) |
| <i>Pinus thunbergii</i> | 0.1±0.3 (1.4) | -1.8±1.6 (7.2) | 0.7±0.4 (1.7) | 21.8±5.4 (29.6) | 38.4±8.0 (52.7) | 8.3±2.7 (14.8) | 20.5±6.0 (35.0) | 4.7±1.6 (8.2) | 12.2±3.9 (21.2) |

Table 7. ANOVA results of shading effects of single tree species for T_{mrt}

| | N | Subset for alpha=0.05 | | | |
|-----------------------------|-----|-----------------------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| <i>Catanopsis sieboldii</i> | 313 | 25.393 | | | |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 209 | | 29.712 | | |
| <i>Machilus thunbergii</i> | 313 | | | 33.076 | |
| <i>Pinus thunbergii</i> | 481 | | | | 38.397 |
| Sig. | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

2. 인간 열환경지수

1) 가로수

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 9 and Table 4 참조), 이 차이는 PET의 열지각(thermal perception) 단계 중 1.5-2.5 단계의 차이를 보여주는 것으로 매우 큰 열 저감 효과를 보인다고 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 2 단계의 차이를, 구실잣밤나무와 먼나무에서 3 단계의 차이가 날 수 있다는 것을 보여주었다. 그러나, Figure 9의 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 것 보다는 저감 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 T_{mrt} 에서 보여 주었던 순서와 유사하게 나타나 인간 열환경지수인 PET에 T_{mrt} 가 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℃의 낮은 결과를 보였으며, 구실잣밤나무에서 최대 11.1℃로 가장 큰 차이를 나타냈고, 왕벚나무에서 최대 6.3℃로 가장 작은 차이를 보였다. 이 차이는 평균 1.0-1.5 단계의 열 스트레스(heat stress) 저감 효과를 나타내는 것이다. 비율적으로는 UTCI에서 평균 12.7-20.0%의 저감 비

율을 보였다. 수종별로는 구실잣밤나무(20.0%)>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, T_a 에 민감하게 반응하는 UTCI에 비해 PET는 T_{mrt} 와 u 에 민감하게 반응하기 때문이다(Jung *et al.*, 2016; Figure 11 참조).

SPSS의 Duncan 방식의 ANOVA분석 결과 가로수 PET에서는 구실잣밤나무(31.3%)>먼나무(27.5%)=담팔수(27.0%)=느티나무(27.0%)>왕벚나무(21.3%)순으로 95% 유의수준에서 열저감비율에 대한 유의성을 나타내었다. UTCI에서는 구실잣밤나무(20.0%)>먼나무(17.6%)>느티나무(17.2%)>담팔수(16.6%)>왕벚나무(12.8%) 순으로 유의성을 나타내었다(Table 8 and 9 참조).

시간대별로도 T_{mrt} 에서와 동일하게 양지에 비해 음지의 열 저감 비율은 일정하게 나타났다(Figure 9 참조). 수종별로도 T_{mrt} 에서와 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.

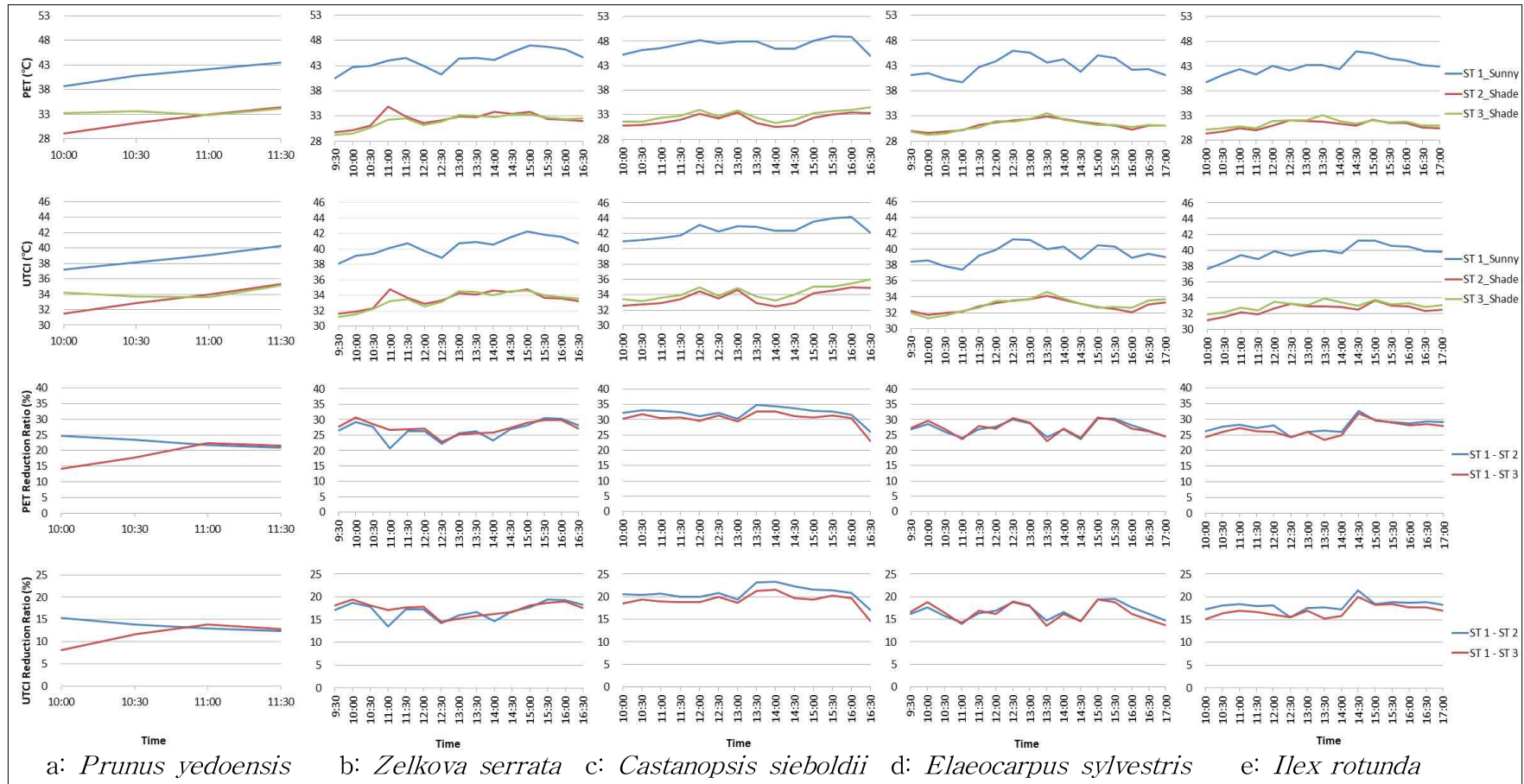


Figure 9. PET and UTCI values and their reduction ratios between sunny and shaded locations of street tree species

Table 8. ANOVA results of shading effects of street tree species for PET.

| | N | Subset for alpha=0.05 | | |
|-------------------------------|-----|-----------------------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 138 | 21.267 | | |
| <i>Zelkova serrata</i> | 431 | | 26.971 | |
| <i>Elaeocarpus sylvestris</i> | 451 | | 27.023 | |
| <i>Ilex rotunda</i> | 445 | | 27.453 | |
| <i>Catanopsis sieboldii</i> | 418 | | | 31.282 |
| Sig. | | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Table 9. ANOVA results of shading effects of street tree species for UTCI.

| | N | Subset for alpha=0.05 | | | | |
|-------------------------------|-----|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 138 | 12.752 | | | | |
| <i>Elaeocarpus sylvestris</i> | 451 | | 16.561 | | | |
| <i>Zelkova serrata</i> | 431 | | | 17.172 | | |
| <i>Ilex rotunda</i> | 445 | | | | 17.631 | |
| <i>Catanopsis sieboldii</i> | 418 | | | | | 20.017 |
| Sig. | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

2) 단독수

4종의 단독수에서 인간 열환경지수인 PET와 UTCI를 이용하여 수목 그늘 하부 음지의 열 저감 효과를 분석해 본 결과, 단독수의 양지는 더움(hot)-매우 더움(very hot)으로 나온 반면 음지는 조금 따뜻함(slightly warm)-따뜻함(warm)으로 나와, 음지가 양지에 비해 평균 6.0-8.3℃ PET 낮은 결과를 보였는데(Figure 10 and Table 6), 이 차이는 PET의 열지각(thermal perception) 단계 중 1.0-1.5 단계의 차이를 보여주는 것으로 매우 큰 열 저감 효과를 보인다고 할 수 있다(Table 3 참조). 최대값을 비교해 보면, 왕벚나무와 곰솔에서 최대 15.9℃, 14.8℃로 가장 큰 차이를 나타냈으며, 후박나무에서 최대 12.2℃로 가장 낮은 값을 나타냈다. 이 차이는 후박나무에서 최대 2 단계의 차이를, 왕벚나무와 곰솔에서 3 단계 정도의 차이가 날 수 있다는 것을 보여주었다. 비율적으로는 PET에서 평균 14.8-20.5%의 저감 비율을 보였다. 수종별로는 곰솔(20.5%)>왕벚나무(19.0%)와 후박나무(18.9%)>구실잣밤나무(14.8%) 순으로 열 저감 효과를 나타냈다. 이 차이는 T_{mrt} 에서 보여 주었던 순서와 유사하게 나타나 인간 열환경지수인 PET에 T_{mrt} 가 큰 영향을 끼친다는 것을 잘 보여주는 것이다.

UTCI에서는 양지가 강한 열 스트레스(strong heat stress)-매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)를 받는 것으로 나타났고 음지는 보통의 열 스트레스(moderate heat stresses)-강한 열 스트레스(strong heat stress)를 받는 것으로 나타났다. 음지가 양지에 비해 평균 3.6-4.8℃의 낮은 결과를 보였으며, 왕벚나무와 곰솔에서 최대 9.2℃, 구실잣밤나무와 후박나무에서 최대 8.1℃의 차이를 보였다. 이 차이는 평균 0.6-0.8(최대 1.0-1.2) 단계의 열 스트레스(heat stress) 저감 효과를 나타내는 것이다. 비율적으로는 UTCI에서 평균 9.2-12.5%의 저감 비율을 보였다. 수종별로는 후박나무(12.5%)>곰솔(12.2%)>왕벚나무(11.7%)>구실잣밤나무(9.2%) 순으로 열 저감 효과를 나타냈다. PET의 결과와 비교해 볼 때, 후박나무가 곰솔과 왕벚나무에 비해 더 높은 열 저감 효과를 보인 이유로는, T_a 와 RH 에 민감하게 반응하는 UTCI에 비해 PET는 T_{mrt} 와 u 에 민감하게 반응하기 때문이다(Jung *et al.*, 2016; Figure 11 참조).

SPSS의 Duncan 방식의 ANOVA분석 결과 단독수 PET에서 곰솔(20.5%)>왕벚

나무(19.1%)=후박나무(18.6%)>구실잣밤나무(14.8%)순으로 95% 유의수준에서 열저감비율에 대한 유의성을 나타내었다. UTCI에서는 후박나무(12.5%)=곰솔(12.2%)>왕벚나무(11.2%)>구실잣밤나무(9.2%)순으로 유의성을 나타내었다(Table 10 and 11 참조).

시간대별로도 T_{mrt} 에서와 동일하게 양지에 비해 음지의 열저감 비율은 일정하게 나타났다(Figure 10 참조). 수종별로도 T_{mrt} 에서와 같이 상록침엽교목(곰솔)이 상록활엽교목(구실잣밤나무, 후박나무)과 낙엽활엽교목(왕벚나무)보다 더 높은 열저감 효과가 있는 것으로 나타났으나, 지엽이 치밀했던 후박나무는 상록침엽교목과 비슷한 결과를 보였다.

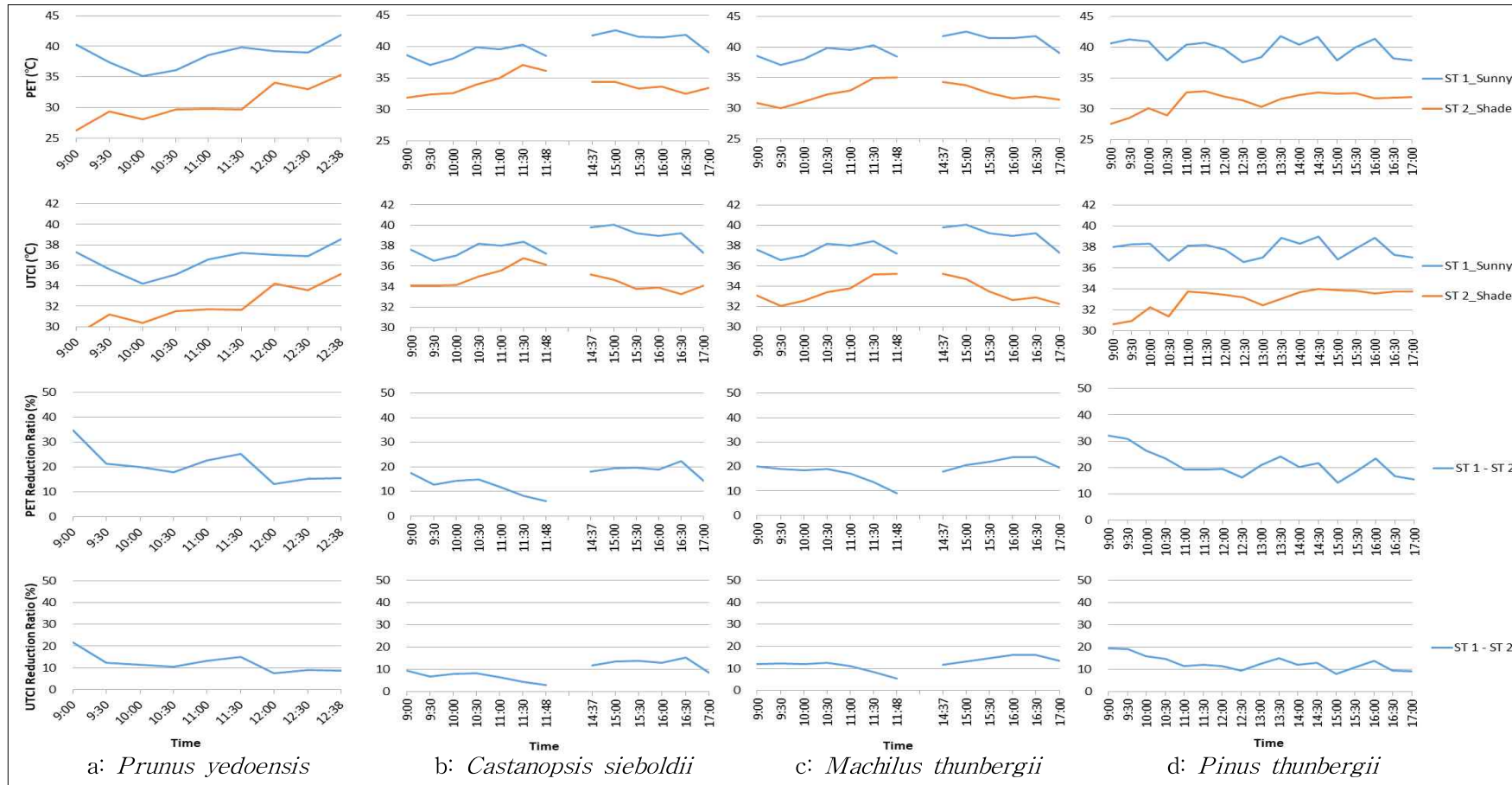


Figure 10. PET and UTCI values and their reduction ratios between sunny and shaded locations of single tree species

Table 10. ANOVA results of shading effects of single tree species for PET

| | N | Subset for alpha=0.05 | | |
|-----------------------------|-----|-----------------------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| <i>Catanopsis sieboldii</i> | 313 | 14.800 | | |
| <i>Machilus thunbergii</i> | 313 | | 18.852 | |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 209 | | 19.095 | |
| <i>Pinus thunbergii</i> | 481 | | | 20.544 |
| Sig. | | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Table 11. ANOVA results of shading effects of single tree species for UTCI

| | N | Subset for alpha=0.05 | | |
|-----------------------------|-----|-----------------------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| <i>Catanopsis sieboldii</i> | 313 | 9.190 | | |
| <i>Prunus yedoensis</i> | 209 | | 11.207 | |
| <i>Pinus thunbergii</i> | 481 | | | 12.234 |
| <i>Machilus thunbergii</i> | 313 | | | 12.519 |
| Sig. | | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

3. 인간 열환경지수 민감도 조사

여름철 기준으로, 인간 열환경지수에서 각각의 미기후 자료들의 오차범위를 설정해 본다면, 한 지표의 반(heat stress 기준으로: PET: 3°C, UTCI: 3°C)을 오차범위의 한계로 잡는 것이 합당할 것으로 생각된다. 그 한계는 오차로 인해 잘못된 지표(예: warm 지역을 hot 지역으로)를 나타낼 확률이 50%이며, 지표를 기존의 단계에 중간 단계를 추가하여 좀 더 세분화하면 오차로 인한 지표 결과 오류를 반감시킬 수 있기 때문이다. 예를 들어, 여름철 PET 지표 3단계(warm-hot-very hot)를 중간 단계를 추가한 6단계(warm-very warm-slightly hot-hot-very hot-extremely hot)로 세분화하면, 오류가 발생하더라도 기존의 지표에서의 한 단계가 아닌 반 단계의 오류 안으로 줄일 수 있게 된다.

PET와 UTCI의 반 단계인 3°C를 발생시킬 수 있는 미기후 요소들의 최대 오차범위를 여름철 기준으로 RayMan 프로그램을 이용하여 살펴보았다. 먼저, 기준이 되는 입력 자료로 신진대사에너지(metabolic rate)는 서 있는 자세에서 발생하는 1.5MET을, 의복은 전형적인 여름철 복장인 긴 바지와 짧은 팔 티셔츠의 의류절연(clothing insulation)수치인 0.55clo로, T_a 은 30°C, u 은 거의 없는 기준(calm)인 0.3 ms⁻¹, RH는 50%, T_{mrt} 는 50°C로 정하였다. 여기서 미기후 요소들의 분석 범위를 T_a 은 20-40°C, u 은 0.3-3.0 ms⁻¹(높이는 지상에서 1.2m 기준), RH는 0-100%, T_{mrt} 는 30-80°C로 하여, 나머지 기준들을 고정한 뒤 각각의 미기후 자료들을 분석 범위에 따라 값들을 입력하여 결과를 분석하였다.

그 결과, T_a 은 PET에서는 8°C의 T_a 변화가 반 단계인 3°C PET의 값을 변경한다고 일률적으로 나타났고, UTCI에서는 T_a 이 20°C 근처에서는 4°C 정도로 나타나다가 40°C로 갈수록 2°C의 T_a 변화가 반 단계인 3°C UTCI정도의 결과를 보였다(Figure 11a 참조).

RH는 PET에서는 75%정도로, UTCI에서는 습도가 낮을 때는 20%정도의 변화에, 습도가 높을 때는 10%의 변화라는 결과를 보이는 것으로 나타나 RH가 PET에는 영향을 적게 미치는 것으로 나타났다(Figure 11b 참조).

u 은 PET에서는 u 이 낮을 때는 0.7 ms⁻¹정도에서, u 이 강할 때는 2.1 ms⁻¹의 결과를 보였으며, UTCI에서는 2.7 ms⁻¹의 결과를 보여 u 에 대한 영향이 PET보

다는 약한 것으로 보인다(Figure 11c 참조).

T_{mrt} 는 PET에서 8℃의 변화가, UTCI에서는 10℃정도의 변화가 보이는 것으로 나타나 T_{mrt} 가 UTCI에는 영향을 적게 미치는 것으로 나타났다(Figure 11d 참조).

그러나, 위의 결과들은 각각의 미기후 자료들이 반 단계의 지표를 변화시킬 수 있는 최대치를 나타낸 것이므로, 실제 연구에서는 각각의 미기후 자료들의 오차만 볼 것이 아니라 그 오차들이 종합적으로 만들어 낼 결과에 대해서 분석하여야 할 것이다.

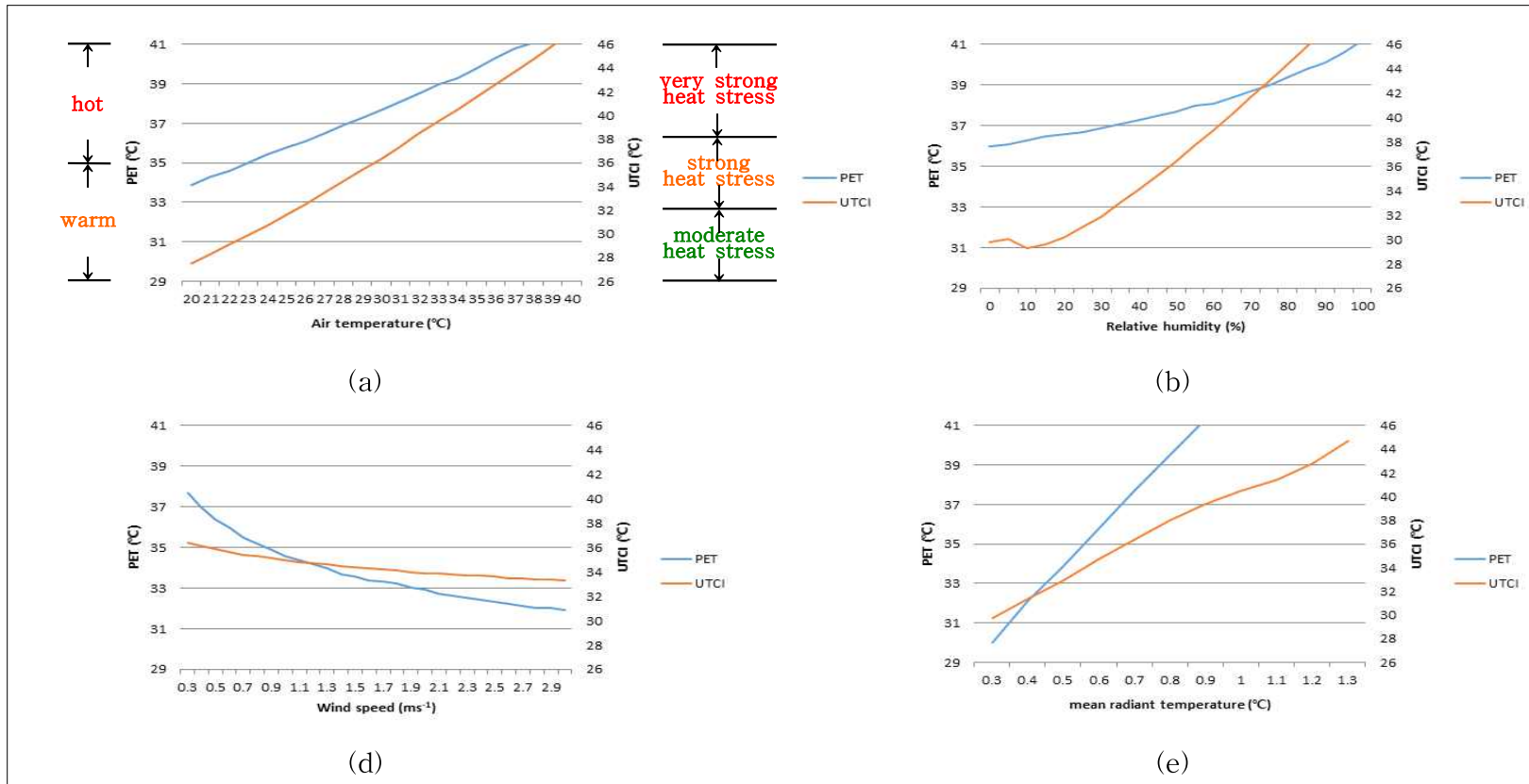


Figure 11. Sensitivity tests of microclimatic factors in human thermal sensation: a) air temperature, b) relative humidity, c) wind speed and d) mean radiant temperature.

4. 기존의 연구들과의 비교

인간 열환경지수 개선에 수목의 태양복사에너지 차감효과가 가장 크게 영향을 미친다고 할 수 있다(Park, 2012; 2013). 본 연구에서 하늘반구(sky hemisphere)에서 내려오는 태양복사에너지 차감율을 분석해 본 결과, 가로수인 왕벚나무 83.0%, 느티나무 90.2%, 구실잣밤나무 92.0%, 담팔수 90.9%, 먼나무 92.7%로 나타났고, 단독수인 왕벚나무 66.7%, 구실잣밤나무 65.5%, 후박나무 75.5%, 곰솔 84.4%로 나타나 Takács *et al.*(2016)의 연구에서 여름철 4종의 수목의 태양복사에너지 차감율이 89-98%였던 것에 비해서는 조금 낮게 나왔으나, 가로수에서는 느티나무, 구실잣밤나무, 담팔수, 먼나무에서 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.

가로수에서 수목 하부의 음지는 양지에 비해 평균적으로 T_a 이 0.2-1.5°C의 저감 효과를 보였으며, RH 는 0.9-5.3% 높은 결과를 나타내었고, 단독수에서 T_a 는 0.1-0.5°C의 저감효과를 보였으며, RH 는 0.5-1.8% 낮은 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°C의 저감 효과와 2% RH 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 10:00-14:00 동안 단독수는 0.9-2.8°C, 가로수는 0.7-2.0°C의 저감 효과를 보였는데, 본 연구에서 가로수에서 구실잣밤나무가 평균 1.5°C, 최대 3.1°C의 저감 효과를 보인 것과 비교해 보면 큰 차이는 나타나지 않았다.

T_{mrt} 에서는 수중에 따라 평균적으로 21.4-30.9°C의 저감 효과를 보여 주었는데, Choi and Lee(2006)의 느티나무(H7.0×W8.0) 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 T_{mrt} 측정을 위해 흑구온도계를 사

용함으로써 발생된 결과가 아닌가 생각해 본다. 흑구온도계는 순복사계 (Net-radiometer)에 비해 정확성과 민감도가 심각하게 떨어지기 때문이다 (Thorsson *et al.*, 2007).

인간 열환경지수에서는 가로수와 단독수에서 수중에 따라 음지가 양지에 비해 평균 8.9-14.8℃ PET(1.5-2.5 단계), 평균 6.0-8.3℃ PET(1.0-1.5 단계) 낮은 결과를 보였는데, Ju *et al.*(2004)의 열면적 지수 4.0이상이었다던 느티나무 (H5.5×W7.0×R35, H12.0×W14.0×R50)의 1.34-1.52℃ WBGT(1/3-3/4 단계) 저감 효과에 비해서는 더 높은 효과를 보인 반면에, Abreu-Harbich *et al.*(2015)의 단독수 12-16℃ PET, 가로수 12.5-14.5℃ PET 저감 효과에 비해서는 다소 낮은 결과를 보이는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서 가로수와 단독수가 여름철 인간 열환경지수(열쾌적성)에 미치는 영향을 분석하기 위해, 제주특별자치도를 대상으로 하여 2015년 여름철(7월, 8월) 낙엽활엽교목 2종과 상록활엽교목 3종 총 5종의 가로수와 2016년 여름철(7월) 낙엽활엽교목 1종, 상록활엽교목 2종과 상록침엽교목 1종 총 4종의 단독수를 각각 1일씩 8일간 수목 하부인 음지와 그 옆의 양지에서 기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지를 측정하여 비교 분석하였다.

가로수에서 기온, 상대습도, 풍속의 차이는 각각 평균 0.2-1.5℃, 0.9-5.3%, 0.1-0.5 ms⁻¹로 미미하였으나, 평균복사온도는 양지가 평균 62.5℃, 음지가 평균 35.4℃로 27.1℃의 매우 큰 차이를 보여 주었다. 단독수에서도 기온, 상대습도, 풍속의 차이는 각각 평균 0.1-0.5℃, 0.5-1.8%, 0.0-0.7 ms⁻¹로 미미하였으나, 평균복사온도는 양지가 평균 56.9℃, 음지가 평균 39.1℃로 17.8℃의 매우 큰 차이를 보여 주었다. 이는 인간 열환경지수(열쾌적성) 분석에서 평균복사온도가 매우 중요한 미기후 요소임을 보여 주었다. 인간 열환경지수인 PET와 UTCI결과에서는 수목 하부의 음지가 오픈스페이스인 양지에 비해 가로수 PET에서는 평균 21.2-31.3%의 저감 비율을 보여 1.5-2.5단계의 열지각(thermal perception) 저감 효과를 나타내었으며, UTCI에서는 평균 12.7-20.0%의 저감 비율을 보여 1.0-1.5단계의 열스트레스 저감 효과를 보이는 것으로 나타났다. 단독수 PET에서는 평균 14.8-20.5%의 저감 비율을 보여 1.0-1.5단계의 열지각 저감 효과를 나타내었다. UTCI에서는 평균 9.2-12.5%의 저감 비율을 보여 0.6-0.8단계의 열스트레스 저감 효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 가로수인 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. 단독수인 낙엽활엽교목 1종, 상록활엽교목 2종과 상록침엽교목

1종의 수목하부인 음지와 주변의 양지를 비교하였을 때 차이 값이 상록침엽교목 1종이 PET에서 상록활엽교목 2종보다는 평균 3.6%, 낙엽활엽교목 1종 보다는 평균 1.9% 더 높게 나타나는 차이가 발생하였지만, 상록활엽교목에 속하는 후박나무는 지엽의 밀도가 높아 침엽활엽교목 만큼의 열환경지수(열쾌적성) 개선 효과를 나타내었다. 이에 따라, 가로수와 단독수의 열 저감 효과에서 지엽의 밀도와 평균복사온도가 인간 열환경지수(열쾌적성) 개선의 주요 영향임을 알 수 있었다.

본 연구는 가로수와 단독수가 인간 열환경지수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연구가 이루어 졌지만, 가로수로 많이 이용되고 있는 낙엽활엽교목은 왕벚나무와 느티나무 2종 밖에 포함시키지 못하고, 단독수로 많이 이용되고 있는 수목을 4종 밖에 포함시키지 못하여 향후 연구에서는 본 연구 방법을 이용하여 더 많은 수종에 대한 자료 구축이 이루어져야 할 것이다. 또한, 최대 열 저감 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 차감율뿐만 아니라 하늘시계지수(sky view factor)도 고려한 사계절 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. 초 록

가로수와 단독수가 여름철 인간 열환경지수(열쾌적성)에 미치는 영향을 분석하기 위해, 가로수는 낙엽활엽교목 2종과 상록활엽교목 3종 총 5종, 단독수는 낙엽활엽교목 1종, 상록활엽교목 2종과 상록침엽교목 1종 총 4종을 대상으로 수목 하부의 음지와 그 옆의 양지에서 미기후 자료를 측정하여 비교 분석하였다. 그 결과, 가로수에서 기온, 상대습도, 풍속의 차이는 각각 평균 0.2-1.5℃, 0.9-5.3%, 0.1-0.5 ms⁻¹, 단독수에서는 각각 평균 0.1-0.5℃, 0.5-1.8%, 0.0-0.7 ms⁻¹로 미미하였으나, 평균복사온도는 가로수에서 평균 27.1℃, 단독수에서 17.8℃의 매우 큰 차이를 보여 주었다. 인간 열환경지수인 PET와 UTCI결과에서는 수목 하부의 음지가 양지에 비해 가로수에서 PET는 평균 21.2-31.3%의 저감 비율을 보여 1.5-2.5단계의 열지각 개선 효과를 나타내었으며, UTCI는 평균 12.7-20.0%의 저감 비율을 보여 1.0-1.5단계의 heat stress 저감 효과를 보이고, 단독수에서 PET는 평균 14.8-20.5%의 저감 비율을 보여 1.0-1.5단계의 열지각 개선 효과를 나타내었으며, UTCI는 평균 9.2-12.5%의 저감 비율을 보여 0.6-0.8단계의 heat stress 저감 효과를 보았다. 또한, 가로수에서 상록활엽교목이 낙엽활엽교목에 비해 PET에서 평균 5% 더 높은 저감 비율을 나타냈지만, 낙엽활엽교목에 속하는 느티나무는 지엽의 밀도가 높아 상록활엽교목 만큼의 열환경지수(열쾌적성) 개선 효과를 나타내었고, 단독수에서 상록침엽교목이 낙엽활엽교목보다 평균 3.6%, 상록활엽교목보다 평균 1.9% 더 높은 저감 비율을 나타냈지만, 상록활엽교목에 속하는 후박나무는 지엽의 밀도가 높아 상록침엽교목 만큼의 열환경지수(열쾌적성) 개선 효과를 나타내었다. 이에 따라, 가로수와 단독수의 여름철 열 저감 효과에서 지엽의 밀도와 평균복사온도가 주요 영향임을 알 수 있었다.

인 용 문 헌

- 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.
- 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.
- 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.
- 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>.
- 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.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. WMO, 7bis, Avenue de la Paix, 1211 Geneva2.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- Park, S. (2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model. PhD dissertation, University of Victoria, Victoria, B.C., Canada.
- Park, S. (2012) Landscape planning and design methods with human thermal sensation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(1): 1-11.
- 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.
- 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.
- 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.

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.

Vaisala, O. (2013) Humidity conversion formulas calculation formulas for humidity.

Yoon, Y. (2003) Temperature lowering effects varied by the arrangement and types of vegetation. *Journal of Korean Turfgrass Science* 17(4): 165-172.

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.