



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 주간 수목의 수형, 지엽밀도,  
식재량에 따른 열환경 분석

-제주특별자치도 제주시를 대상으로-

제주대학교 대학원

원예학과

신지환

2022년 2월

# 여름철 주간 수목의 수형, 지엽밀도, 식재량에 따른 열환경 분석

-제주특별자치도 제주시를 대상으로-

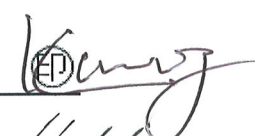


지도교수 박수국

신지환

이 논문을 농학 석사학위 논문으로 제출함

2021년 12월

신지환의 농학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 강훈   
위 원 박수국   
위 원 조영열 

제주대학교 대학원

2021년 12월

Analysis of Thermal Environment depending  
on Tree Shape, Leaf Area Index and Planting  
Rate in Summer Daytime

–Jeju–Si, Jeju Special Self–Governing Province–

Jihwan Sin

(Supervised by Professor Sookuk Park)

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

2021. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Horticultural Science

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목차

List of Tables .....	I
List of Figures .....	II
Abstract .....	III
I. 서론 .....	1
II. 연구방법 .....	3
1. 컴퓨터 시뮬레이션 모델.....	3
1) 수목의 수형변화에 따른 컴퓨터 시뮬레이션.....	3
2) 수목의 LAI 변화에 따른 컴퓨터 시뮬레이션.....	7
3) 수목의 식재량 변화에 따른 컴퓨터 시뮬레이션.....	9
2. 인간 열환경지수.....	12
III. 결과 및 고찰.....	14
1. 미기후 실측자료와 비교.....	14
2. 수목의 수형 변화에 따른 시뮬레이션 결과.....	16
1) 미기후요소.....	18
2) PET.....	18
3. 수목의 LAI 변화에 따른 시뮬레이션 결과.....	23
4. 수목의 식재량 변화에 따른 시뮬레이션 결과.....	25
1) 기온.....	25
2) 상대습도.....	25

3) 풍속.....	26
4) 평균복사온도.....	26
5) PET.....	26
IV. 결론 .....	34
V. 초록 .....	35
Reference .....	36

# List of Tables

Table 1. ENVI-met simulation forcing input data from automated synoptic observing system data at Jeju weather station.....	4
Table 2. Computer simulation variables by tree shape.....	5
Table 3. Computer simulation variables by LAI.....	8
Table 4. Computer simulation variables by planting rate.....	11
Table 5. The levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI).....	13
Table 6. $T_{mrt}$ difference by tree shape.....	21
Table 7. PET difference by tree shape.....	22
Table 8. Mean values of air temperature, relative humidity, wind speed, mean radiant temperature and PET of scenario.....	28

# List of Figures

Fig. 1. ENVI-met area input file of tree shape.....	6
Fig. 2. ENVI-met area input file of planting rate.....	10
Fig. 3. Linear regression analysis between time and differences of measured microclimatic data and ENVI-met results.....	15
Fig. 4. Microclimate result for whole area mean value by tree shape.....	17
Fig. 5. Microclimate result for tree shade area mean value by tree shape.....	20
Fig. 6. Microclimate result for minimum value by LAI.....	24
Fig. 7. Microclimate result for tree planting area mean value by planting rate.....	33



# Abstract

The effect of reducing the thermal environment of trees was analyzed from three perspectives: tree shape, leaf area index (LAI) and planting rate. Three types of trees were used: an ellipsoid, a triangle, and an inverted triangle forms. Although the difference by forms was insignificant in air temperature ( $T_a$ ), relative humidity ( $RH$ ) and wind speed ( $Ws$ ), the elliptical form showed the most excellent thermal environment reduction effect at the mean radiant temperature ( $T_{mrt}$ ). The higher LAI of trees, the greater the thermal environment reduction effect. Above a certain LAI level, the increase in the reduction effect was found to decrease. The planting rate of trees was determined by halving the planting amount from 100% to 12.5% and LAIs set to 2 and 4. The greater the planting amount of trees, the greater the thermal environment reduction effect. The higher LAIs, the greater the difference in the reduction effect. As the planting rate increased, the mean radiant temperature differed by 14.4–16.5°C on average. In physiological equivalent temperature (PET), there was a difference of up to two levels from the 'very hot' to the 'hot' level. The difference in  $T_a$ ,  $RH$  and  $Ws$  was found to be insignificant in the tree type, LAI and planting rate of trees. Therefore, reducing the mean radiant temperature is the most effective on improving the thermal environment.

## I. 서론

최근 급격한 도시화로 인하여 온실가스 배출에 따른 온난화 현상이 야기되고 있으며, 이에 따른 도시열섬현상으로 인한 도시민 삶의 질 저하가 우려되고 있다(Huang *et al.*, 2019). 질병관리본부에서 발표한 자료에 따르면 2021년 신고된 온열질환자는 총 1,376명으로 2020년 대비 27.6% 증가한 것으로 나타났다(질병관리청 역학관리보고서, 2021). 이 중 논·밭, 산과 강가 및 해변 등을 제외한 도시화 지역의 환자발생율이 78.1%로 도시열섬현상의 폐해가 심각한 것으로 나타났다. 도시열섬현상의 완화 방안으로 그린스페이스의 온도저감능력의 잠재력은 널리 인정받고 있다(Tumini and Rubio-Bellido, 2016).

도시열섬현상에 관한 연구는 기온과 지표온도를 분석하는 방법으로 많이 진행되고 있으며(Estoque *et al.*, 2017; Giridharan *et al.*, 2004; Kikon *et al.*, 2016; Paul and Larissa, 2014), 최근에는 복사량을 이용하여 분석한 연구(Demuzere *et al.*, 2013)와 PET, UTCI와 같은 인간 열환경지수를 이용하여 분석한 연구도 진행되고 있다(van Hove *et al.*, 2015).

도시지역에서 그린스페이스가 열환경에 주는 영향에 관한 연구는 식물의 배치 방법에 따른 열환경을 분석한 연구(Lin and Lin, 2016; Sodoudi *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2017; Zhou and Cao, 2020), 배치방법에 더하여 식재 식물의 수종을 고려한 연구(Abreu-Harbich *et al.*, 2015)가 있다.

도시열섬현상의 완화를 위한 방법으로는 그린스페이스 뿐만 아니라 그레이스페이스, 즉 인공 건축물을 이용한 방법도 연구되고 있다. 수목 식재 없이 도시의 건축물만 있는 공간의 하늘시계지수(Sky view factor, SVF)를 이용하여 분석한 연구, 수목의 수고와 수관폭, 지하고, 지엽밀도(Leaf area index, LAI), 건축물과 거리의 구조 등을 변수로 하여 비교한 연구(Lin *et al.*, 2021; Morakinyo *et al.*, 2016, 2017, 2020), 인공구조물과 수목의 열환경 저감 효과를 비교한 연구(Cheung and Jim, 2018; Colter *et al.*, 2019)가 있다.

도시열섬현상의 완화를 위한 여러 연구가 진행되고 있으나 수목의 수형에 따른 분석은 아직 미흡하며, 또한 그레이인프라를 제외한 순수한 그린스페이스에

관한 연구도 아직 부족하기 때문에 본 연구에서는 수목이 단독적으로 인간의 열 환경 저감에 미치는 영향을 분석하기 위하여 ENVI-met 시뮬레이션을 이용하여 수목의 수형, 지엽밀도 그리고 식재량의 세가지 관점에서 열환경을 분석하였다.

## II. 연구방법

### 1. 컴퓨터 시뮬레이션 모델

열환경 분석은 전 세계적으로 가장 보편적으로 이용하는 미기후 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met V4.4.6을 이용하여 분석하였다. 시뮬레이션에 사용한 기후자료는 제주시의 30년 여름철 일간 평균자료와 가장 유사한 2011년 7월 23일의 ASOS 자료 중 기온, 상대습도, 풍향 및 풍속의 24시간 자료를 이용하였다 (Table 1). 시뮬레이션 자료의 값은 지상 1.5m 높이의 자료를 분석하였다. 인간 열환경지수는 Rayman Pro Ver. 2.2를 이용하여 계산하였으며, 모든 자료의 분석은 Microsoft Excel 365를 이용하였다.

#### 1) 수목의 수형 변화에 따른 컴퓨터 시뮬레이션

수목의 수형 변화에 따른 열환경 변화를 분석하기 위하여 수목의 대표적 수형인 원정형, 삼각형, 역삼각형의 세가지 수형을 변수로 하였다(Table 2). 수목은 제주도의 가로수 평균인 수고 7m, 수관폭 7m의 형태(Jo *et al.*, 2017)와 대조를 위하여 공공 데이터 포털(<https://www.data.go.kr/data/15046230/fileData.do>)에서 제공하는 서울시 가로수의 중위값인 수고 10m, 수관폭 5m의 형태로 설정하였다. 또한, 수목의 지엽밀도는 수관부 1m 마다 엽밀도(Leaf area density, LAD) 값을 0.5로 동일하게 설정하여 수고 7m 수목은 LAI를 2로, 10m 수목은 LAI를 3으로 수목을 제작하여 시뮬레이션을 진행하였다. Area input file은 수형의 영향만을 파악하기 위하여 건축물 없는 공터에 단독수를 식재하여 만들었다 (Fig. 1). Model domain은 1grid 당 1m×1m×1m로 설정하여 40×40×20(grid)로 만들었고, 원활한 시뮬레이션을 위하여 nesting grid를 10 추가하였다.

Table 1. ENVI-met simulation forcing input data from automated synoptic observing system data at Jeju weather station

Jul. 23. 2011			
Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (ms <sup>-1</sup> , 10m height)
05:00	22.7	86	2.8
06:00	22.7	86	(Wind direction: 45°)
07:00	23.0	84	
08:00	24.5	78	
09:00	25.7	76	
10:00	26.3	77	
11:00	27.0	71	
12:00	28.2	65	
13:00	28.4	67	
14:00	27.9	67	
15:00	27.6	70	
16:00	27.8	70	
17:00	27.5	72	
18:00	27.0	75	
19:00	26.4	80	
20:00	25.7	85	
21:00	25.3	87	
22:00	25.0	89	
23:00	24.8	88	
00:00	23.8	82	
01:00	23.6	84	
02:00	23.4	84	
03:00	23.3	86	
04:00	23.0	87	

Table 2. Computer simulation variables by tree shape

Variable		
Tree shape	Ellipsoid, Triangle, invert Triangle	
Height (trunk height)	7(3)m	10(4)m
Width	7m	5m
LAI	2	3

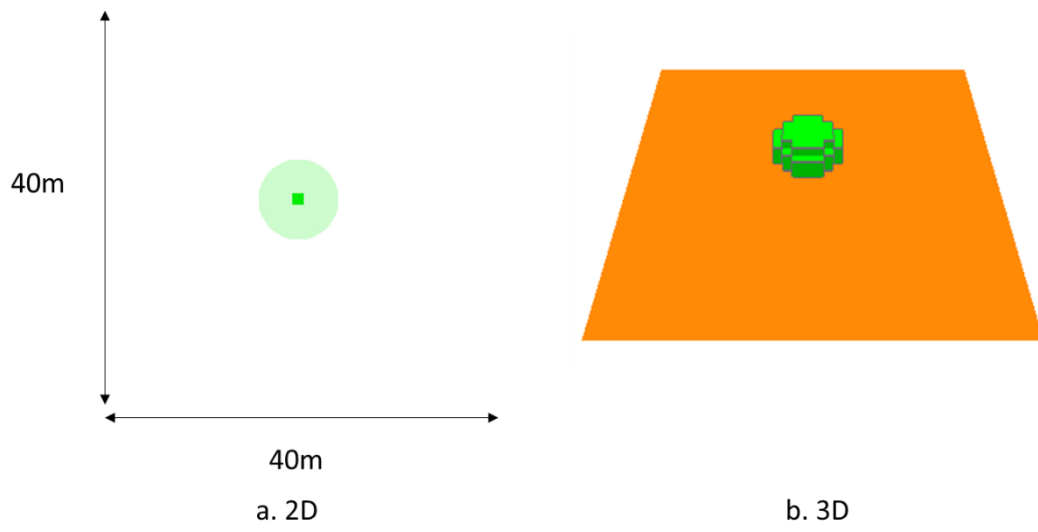


Figure 1. ENVI-met area input file of tree shapes

## 2) 수목의 LAI 변화에 따른 컴퓨터 시뮬레이션

수목 LAI의 변화에 따른 열환경 변화를 분석하기 위하여, 원정형 수형의 수목의 LAI를 변수로 하였다(Table 3). 수목의 형태는 실측과의 비교를 위하여 제주시의 가로수 느티나무의 수형과 같은 수치인 수고 7m, 수관폭 5m로 설정하였으며, 가로수 느티나무의 평균 LAI 2를 기본으로 설정하여 LAI를 2배에서 10배로 변경한 수목을 제작하여 시뮬레이션을 진행하였다. Area input file은 Fig. 1과 같은 형태로 수목만을 변경하여 진행하였다.



Table 3. Computer simulation variables by LAI

Variable	
Tree shape	Ellipsoid
Height (trunk height)	7(3)m
Width	5m
LAI	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20

### 3) 수목의 식재량 변화에 따른 컴퓨터 시뮬레이션

수목의 식재량의 변화에 따른 열환경 변화를 분석하기 위하여, Table 4와 같이 식재량을 변경하며 시뮬레이션을 진행하였다. 수목은 이전의 시뮬레이션과 마찬가지로 실측과의 비교를 위하여 느티나무와 같은 형태로 제작하였다. 또한 동일한 식재량에도 수목의 LAI에 따른 열환경 저감 효과 비교를 위하여 LAI 2를 기본으로 하여, LAI를 2배 증가시킨 LAI 4의 수목을 제작하여, 총 종류의 수목으로 시뮬레이션을 진행하였다. 수목의 식재량은 수목의 수관이 겹치지 않도록 등간격으로 배치하였으며, 100%를 기준으로 식재량을 반감하는 방식으로 식재하였다. Area input file은 식재량의 변화에 따른 열환경 변화를 원활하게 분석하기 위하여 건물의 설치 없이 수목의 식재와 토양 피복만을 이용하여 작성하였다 (Fig. 2). Model domain은 X×Y×Z 방향의 분석 크기를 1m×1m×1m로 설정하여, 중심부 100m×100m에 수목을 식재하였고 원활한 시뮬레이션을 위하여 각 30m씩 여유공간을 추가하여 총 분석체적 130×130×30(grid)로 작성하였다.

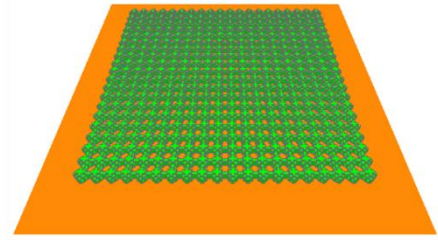
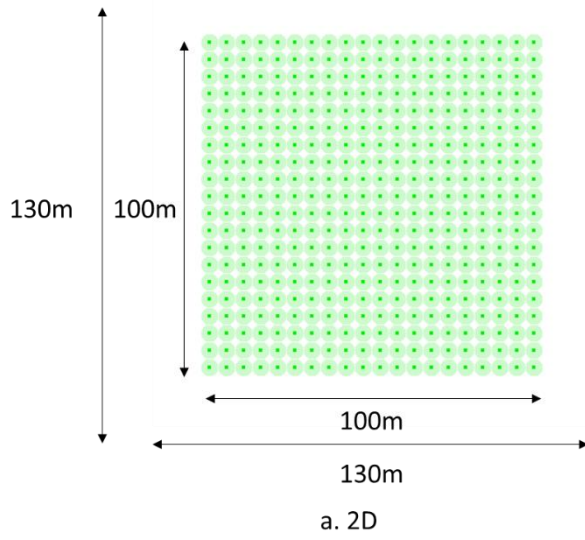


Figure 2. ENVI-met area input file of planting ratio

Table 4. Computer simulation variables by planting rate

Variable	
Tree shape	Ellipsoid
Height (trunk height)	7(3)m
Width	5m
LAI	2, 4
Planting rate (%)	Coverage rate (%)
12.5	6.4
25	13.0
47.5	23.5
100	52.0

## 2. 인간 열환경지수

인간 열환경지수는 인간 에너지 균형 모델(human energy balance model)을 기반으로 하여 인체를 둘러싼 환경과 인체 사이에서 에너지의 흡수와 방출을 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(Höppe, 1999; 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 지구 복사에너지양을 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)].

Table 5. The levels of physiological equivalent temperature (PET; Höppe, 1999; Matzarakis *et al.*, 1999)

Thermal perception	PET (°C)
very cold	< 4
cold	4 ~ 8
cool	8 ~ 13
slightly cool	13 ~ 18
neutral	18 ~ 23
slightly warm	23 ~ 29
warm	29 ~ 35
hot	35 ~ 41
very hot	> 41

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. 미기후 실측 자료와의 비교

ENVI-met 시뮬레이션 결과값과 실측과의 검증을 위하여, 일반적으로 가로수와 단독수로 많이 이용되며, 시뮬레이션과 가장 유사한 수목의 유형을 가진 느티나무의 자료를 이용하였다. 느티나무의 실측 미기후 자료는 제주특별자치도 제주시 일도이동의 가로수(30° 30' 08" N, 126° 32' 48" E)를 2015년 8월 4일 10시부터 16시까지 기온, 상대습도, 풍향, 풍속, 태양 및 지구복사에너지를 실측한 자료를 이용하였다. 실측한 자료와 시뮬레이션 자료를 비교한 결과, 기온(air temperature,  $T_a$ )의 결정계수는  $R^2=0.8284$ , 상대습도(relative humidity,  $RH$ )는  $R^2=0.9580$ , 풍속(wind speed,  $Ws$ )은  $R^2=0.7305$ 로 나타났다(Fig. 3). 평균 복사온도(mean radiant temperature,  $T_{mrt}$ )는 양지와 음지의 값의 차이가 크기 때문에 별도로 계산하였으며, 양지는  $R^2=0.9657$ , 음지는  $R^2=0.8834$ 로 모든 미기후 자료에서 높게 나타났으므로 ENVI-met의 결과값은 신뢰할 수 있다 하겠다.

시뮬레이션 자료와 실측 자료의 비교를 통하여 보정식을 추출하고, 추출한 보정식을 통하여 시뮬레이션 결과값을 보정하여 분석하였다.

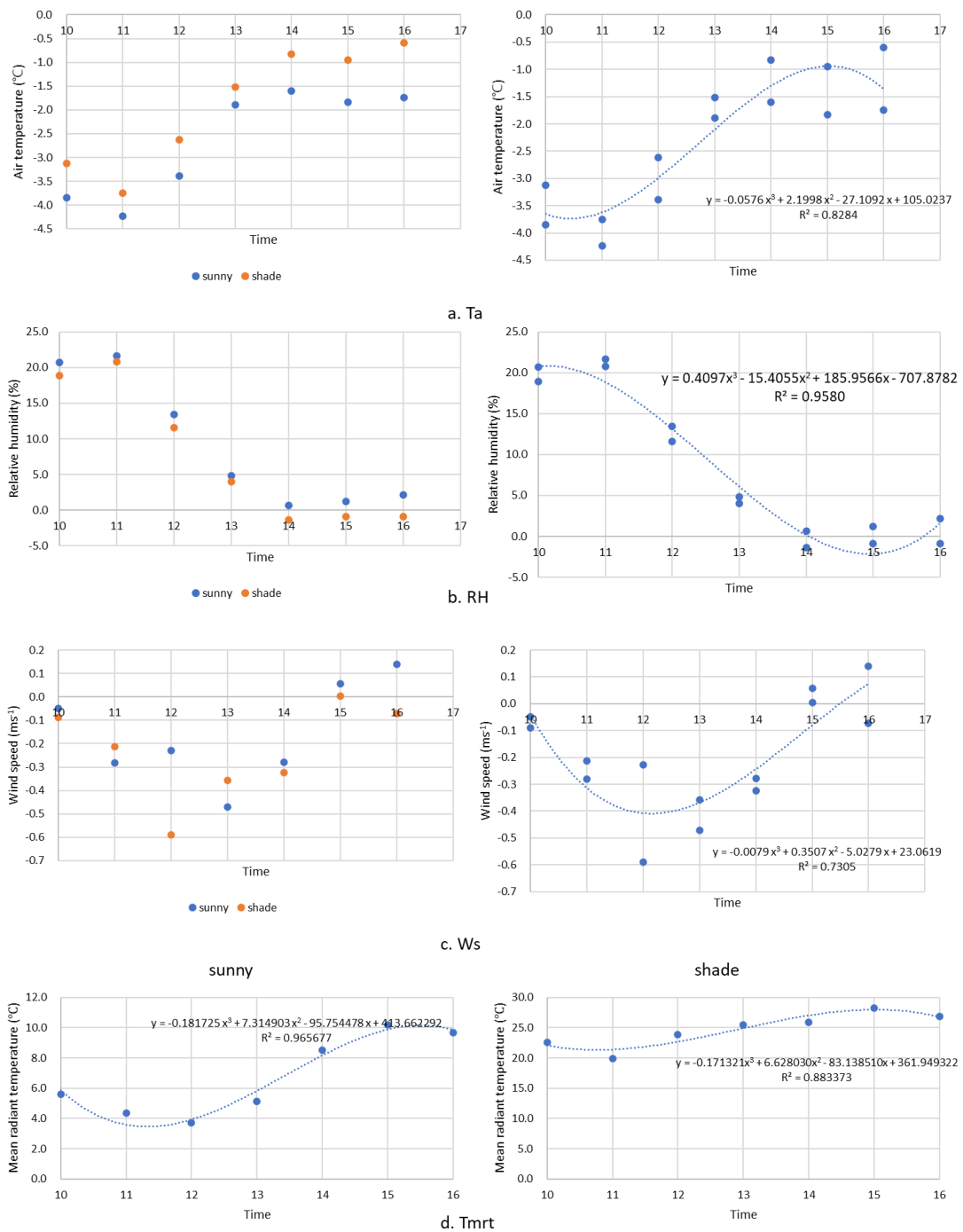


Figure 3. Linear regression analysis between time and differences of measured microclimatic data and ENVI-met results



## 2. 수목의 수형 변화에 따른 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과는 1차적으로 시뮬레이션 area input file 전체의 값을 평균내어 분석하였으나, 수목의 음영의 영향을 받은 영역보다 양지영역이 더 많아 수목의 수고와 수형에 따른 차이가 나타나지 않았다(Fig. 4). 이에 따라 수목의 음영의 영향을 받는 Grid의 값을 평균내어 분석하였다.

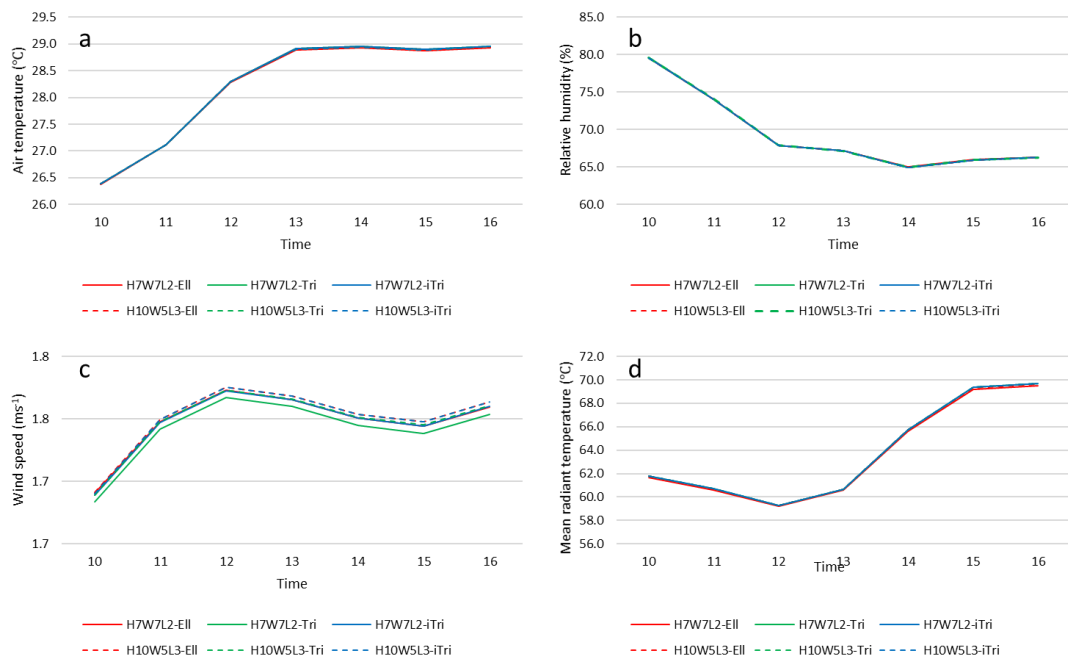


Figure 4. Microclimate results for whole area mean values by tree shapes (a: air temperature, b: relative humidity, c: wind speed, d: mean radiant temperature, Ell: Ellipsoid, Tri: Triangle, iTri: Inverted triangle)

## 1) 미기후 요소

수목의 수형별로 주간 시간대의 미기후 요소를 분석한 결과,  $T_a$ 는 수고 7m 수목의 결과와 수고 10m 수목의 결과가 수형별로는 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 5a).

$RH$ 는  $T_a$ 와 마찬가지로의 결과가 나타났다(Fig. 5b). 각각 수고 7m 수목과 수고 10m 수목에서 각 수형별 차이가 나타나지 않았다.

$W_s$ 에서도 마찬가지로 수고 7m와 수고 10m에서 수형별로  $W_s$ 의 차이는 없는 것으로 나타났다(Fig. 5c).

$T_{mrt}$ 는 원정형이 가장 열환경 저감효과가 뛰어나고, 역삼각형, 삼각형 순으로 효과가 좋은 것으로 나타났다(Fig. 5d). 또한 모든 경우에서 12시에서 13시에 평균복사온도가 감소한 후 다시 증가하였는데, 이는 태양의 고도에 따른 수목의 음영의 변화에 따른 것이라 사료된다.

각 수형별 차이는 수고 7m에서 원정형과 삼각형의 차이가 평균  $2.6^{\circ}\text{C}$ ( $1.7\sim 3.1^{\circ}\text{C}$ )로 가장 큰 차이가 나타났다(Table 5). 원정형과 역삼각형의 차이가 평균  $2.0^{\circ}\text{C}$ ( $1.6\sim 2.9^{\circ}\text{C}$ )로 나타났고, 삼각형과 역삼각형은 평균  $0.6^{\circ}\text{C}$ ( $0.0\sim 1.1^{\circ}\text{C}$ )로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 수고 10m에서 원정형과 삼각형의 차이는 평균  $1.4^{\circ}\text{C}$ ( $0.2\sim 2.8^{\circ}\text{C}$ )로 가장 크게 나타났다. 원정형과 역삼각형의 차이는 평균  $0.5^{\circ}\text{C}$ ( $-0.4\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ )로 나타났고, 삼각형과 역삼각형은 평균  $0.9^{\circ}\text{C}$ ( $-2.3\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ )로 나타났다.

## 2) PET

수목의 수형별로 주간 시간대의 PET를 분석한 결과, 수고 10m의 삼각형의 15:00시를 제외한 모든 경우에서 ‘따뜻함’ 단계가 나타났다(Fig. 5e). 수형별로는  $T_{mrt}$ 와 마찬가지로 원정형에서 가장 열환경 저감효과가 뛰어나고, 역삼각형, 삼각형 순으로 좋은 것으로 나타났다.

각 수형별 PET 차이는 수고 7m에서 원정형과 삼각형에서 평균  $0.7^{\circ}\text{C}$

(0.4~0.8℃)로 가장 큰 차이가 나타났다(Table 7). 원정형과 역삼각형의 차이가 평균 0.5℃(0.4~0.8℃)로 나타났으며, 삼각형과 역삼각형의 차이는 평균 0.1℃(0.0~0.3℃)로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 수고 10m에서 원정형과 삼각형의 차이가 평균 0.3℃(0.0~0.6℃)로 가장 크게 나타났으나, 삼각형과 역삼각형에서 평균 0.2℃(-0.5~0.1℃), 원정형과 역삼각형의 차이는 평균 0.1℃(-0.1~0.3℃)로 각 수형별 PET 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

모든 미기후 요소와 PET에서 수고 10m의 수목이 지엽밀도가 더 높음에도 불구하고 수고 7m의 수목이 열환경 저감 효과가 높은 것으로 나타났다. 이는 수고 10m 수목은 지하고가 4m이고, 수고 7m 수목은 지하고가 3m이므로 수고 7m의 수목이 분석기준인 1.5m 높이의 열환경에 더 큰 영향을 미쳤기 때문이라 사료된다.

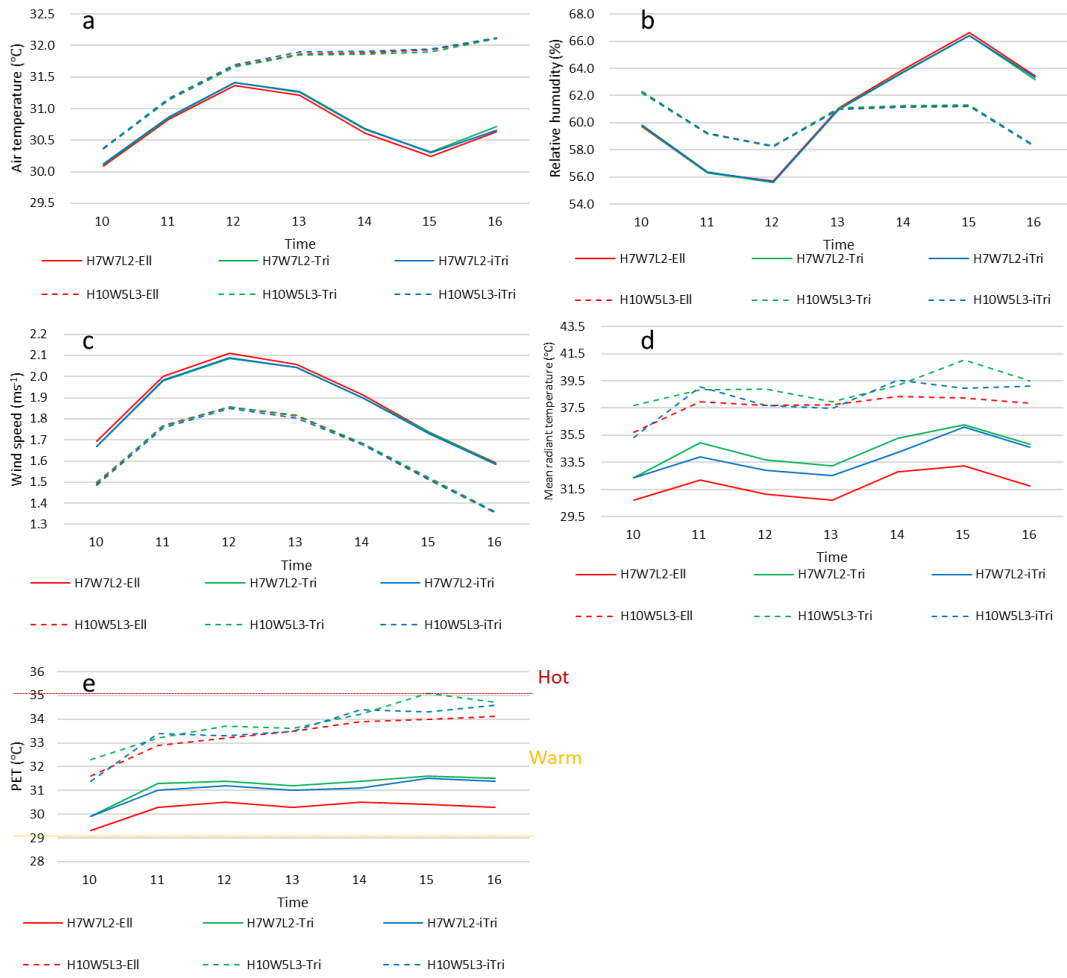


Figure 5. Microclimate results for tree shade area mean values by tree shapes (a: air temperature, b: relative humidity, c: wind speed, d: mean radiant temperature, e: PET, Ell: Ellipsoid, Tri: Triangle, iTri: Inverted triangle)

Table 6.  $T_{mrt}$  differences by tree shapes (Ell: Ellipsoid, Tri: Triangle, iTri: Inverted triangle)

Height	7m			10m			
	Tree shape	Ell - Tri	Ell - iTri	Ell - Tri	Ell - iTri	Ell - iTri	
10:00		-1.7	-1.6	0.0	-2.0	0.4	2.3
11:00		-2.8	-1.7	1.0	-0.9	-1.1	-0.2
12:00		-2.5	-1.8	0.8	-1.3	0.0	1.2
13:00		-2.5	-1.8	0.7	-0.2	0.3	0.5
14:00		-2.5	-1.4	1.1	-0.9	-1.2	-0.3
15:00		-3.0	-2.8	0.2	-2.8	-0.7	2.1
16:00		-3.1	-2.9	0.2	-1.6	-1.2	0.4
Mean		-2.6	-2.0	0.6	-1.4	-0.5	0.9

Table 7. PET differences by tree shapes (Ell: Ellipsoid, Tri: Triangle, iTri: Inverted triangle)

Height	7m			10m		
	Ell - Tri	Ell - iTri	Ell - iTri	Ell - Tri	Ell - iTri	Ell - iTri
10:00	-0.4	-0.4	0.0	-0.4	0.1	0.5
11:00	-0.7	-0.5	0.2	-0.2	-0.3	-0.1
12:00	-0.7	-0.5	0.2	-0.3	0.0	0.3
13:00	-0.6	-0.5	0.1	0.0	0.1	0.1
14:00	-0.7	-0.4	0.3	-0.2	-0.3	-0.1
15:00	-0.8	-0.7	0.1	-0.6	-0.2	0.4
16:00	-0.8	-0.8	0.0	-0.4	-0.3	0.1
Mean	-0.7	-0.5	0.1	-0.3	-0.1	0.2

### 3. 수목의 LAI 변화에 따른 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 분석은 수목의 LAI의 변화에 따른 열환경 저감 효과의 분석을 위하여 수목의 음영의 영향을 받는 영역의 자료 중에서 최저치를 나타내는 Grid의 자료를 이용하여 분석하였으며, 열환경이 가장 더운 14:00시에서 16:00시의 자료를 이용하였다.

시뮬레이션 자료의 분석 결과,  $T_a$ 는 LAI의 증가에 따라 낮은 값이 나타났다 (Fig. 6).  $RH$ 와  $Ws$ 는 LAI의 증가에 따라 높은 값이 나타났다.  $T_a$ ,  $RH$ ,  $Ws$ 는 LAI의 변화에 따른 값의 차이는 미미하지만, LAI의 변화에 따라 일관되게 변화하였다.

$T_{mrt}$ 에서도 마찬가지로 LAI의 증가에 따라  $T_{mrt}$  값이 감소하는 것으로 나타났다. LAI의 증가에 따른  $T_{mrt}$  감소량은 점차 감소하는 것으로 나타났다. LAI 2에서 LAI 10까지는  $T_{mrt}$ 의 감소가 크게 나타났지만, LAI 10에서 LAI 20간에는 그 차이가 미미한 것으로 나타났다.

PET에서도  $T_{mrt}$ 와 유사한 결과가 나타났다. LAI 2에서 LAI 4까지는 ‘매우 더움’ 단계로 나타났고, LAI 6부터는 ‘더움’ 단계가 나타났다. LAI의 증가에 따라 PET 값이 점차 감소하였으며, LAI 10까지 증가시에는 감소가 크게 나타났지만, LAI 10 이상에서는 LAI의 증가에 따른 PET 감소량이 미미한 것으로 나타났다.



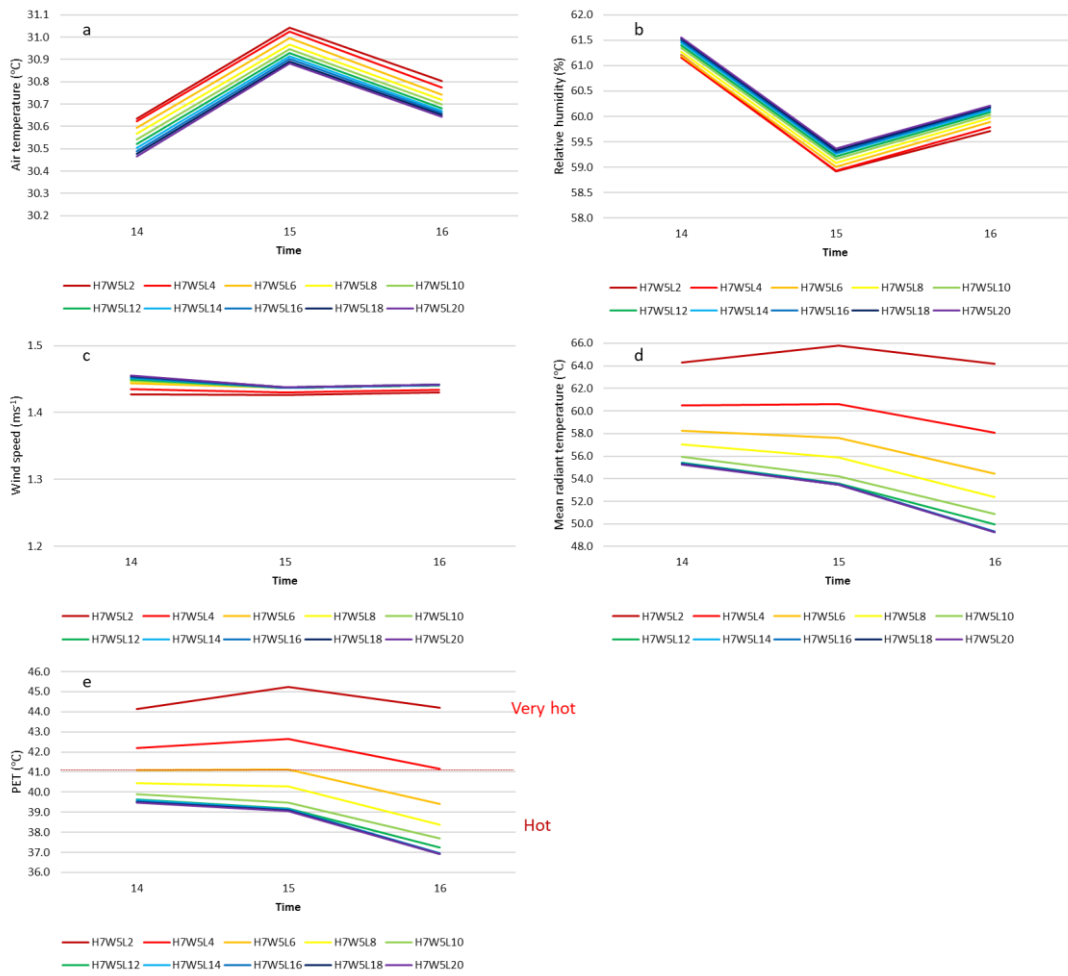


Figure 6. Microclimate results for values by LAI (a: air temperature, b: relative humidity, c: wind speed, d: mean radiant temperature, e: PET)

#### 4. 수목의 식재량 변화에 따른 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 분석은 전체 area input file 중 중심부의 식재영역인 100\*100(grid)의 값을 평균내어 분석하였다.

##### 1) 기온

수목의 식재량별로 주간 시간대의  $T_a$ 를 분석한 결과, LAI 2에서 식재량별로 기온차이는 없는 것으로 나타났다(Fig. 9a, Table 7). LAI 4에서는 식재량 12.5% 평균 31.6°C에서 식재량 100% 평균 31.2°C로 소폭이지만 식재량이 증가함에 따라 감소하였으나 그 차이는 미미한 것으로 나타났다.

LAI 증가에 따른 차이는 식재량 12.5%에서 평균 0.0°C에서 식재량 100% 평균 0.4°C로 식재량이 증가함에 따라 LAI 증가시  $T_a$  차이가 증가하는 경향이 나타났다.

##### 2) 상대습도

수목의 식재량별로 주간 시간대의  $RH$ 를 분석한 결과, LAI 2에서 식재량 12.5%, 25.0%, 47.5%에서 식재량별로 차이가 없었으며, 식재량 100%에서 평균 0.1% 차이를 보이며 식재량별로  $RH$  차이는 미미한 것으로 나타났다(Fig. 9b, Table 7). LAI 4에서는 식재량 12.5% 평균 60.1%, 식재량 100% 평균 61.4%로 식재량이 증가함에 따라  $RH$ 가 증가하였으나, 그 차이는  $T_a$ 와 마찬가지로 미미한 것으로 나타났다.

LAI 증가에 따른 차이는 식재량 12.5%에서 평균 0.1%, 식재량 100% 평균 1.3%로 식재량이 증가함에 따라 LAI 증가시  $RH$  차이가 증가하는 경향이 나타났다.

### 3) 풍속

수목의 식재량별로 주간 시간대의  $Ws$ 를 분석한 결과, 모든 경우에서  $Ws$ 의 식재량별 차이는  $0.1\text{ms}^{-1}$ 이하로 미미한 것으로 나타났다(Fig. 9c, Table 7). LAI 증가에 따른 차이는 또한 마찬가지로 식재량 12.5%에서 평균  $0.1\text{ms}^{-1}$ 로 LAI 증가에 따라 풍속이 소폭 증가하였으나, 그 차이는 미미한 것으로 나타났다.

### 4) 평균복사온도

수목의 식재량별로 주간 시간대의  $T_{mrt}$ 를 분석한 결과, LAI 2에서 식재량 12.5%에서 평균  $60.0^{\circ}\text{C}$ , 식재량 25.0%에서 평균  $57.5^{\circ}\text{C}$ , 식재량 47.5%에서 평균  $53.1^{\circ}\text{C}$ , 식재량 100%에서 평균  $45.6^{\circ}\text{C}$ 로 식재량이 증가함에 따라  $T_{mrt}$  값이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 9d, Table 7). LAI 4에서는 식재량 12.5%에서 평균  $59.7^{\circ}\text{C}$ , 식재량 25.0%에서 평균  $56.9^{\circ}\text{C}$ , 식재량 47.5%에서 평균  $51.9^{\circ}\text{C}$ , 식재량 100%에서 평균  $43.2^{\circ}\text{C}$ 로 식재량이 증가함에 따라  $T_{mrt}$  값이 감소하는 것으로 나타났으며 LAI 2보다 감소량이 큰 것으로 나타났다.

LAI 증가에 따른 차이는 식재량 12.5%에서 평균  $0.3^{\circ}\text{C}$ , 식재량 25.0%에서 평균  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 식재량 47.5%에서 평균  $1.2^{\circ}\text{C}$ , 식재량 100%에서  $2.4^{\circ}\text{C}$ 로 차이값은 식재량의 증가에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

수목의 식재량별  $T_{mrt}$ 는 식재량 100%임에도 이전 장의 수목을 한 그루만 식재한 수형별  $T_{mrt}$ 보다 높은 값이 나타났다. 이는 평균 방식의 차이 때문인데, 수목의 수형별  $T_{mrt}$ 의 평균은 수목의 음영의 영향을 받은 Grid의 평균값을 구하였다. 이에 반해 수목의 식재량별  $T_{mrt}$ 의 평균은 수목이 식재된  $100*100$ (Grid)의 평균값을 구하였다. 식재량 100%의 경우에도 실제 수목의 피복정도는 52.0%로 양지 또한 포함되어 있기 때문에  $T_{mrt}$  값이 높게 나타난 것이다.

### 5) PET

수목의 식재량별로 주간 시간대의 PET를 분석한 결과, LAI 2에서 식재량 12.5%

평균 42.7°C로 '매우 더움' 단계가 나타났고, 식재량 25.0%에서 평균 41.5°C로 '더움'에서 '매우 더움' 단계가 나타났다(Fig. 7e, Table 7). 식재량 47.5%에서 평균 39.6°C, 식재량 100%에서 평균 36.5°C로 '더움' 단계가 나타났다. LAI 4에서는 식재량 12.5%에서 평균 42.4°C로 '매우 더움' 단계가 나타났고, 식재량 25.0%에서 평균 41.2°C로 '더움'에서 '매우 더움' 단계가 나타났다. 식재량 47.5%에서 평균 39.0°C로 '더움' 단계가 나타났고, 식재량 100%에서 평균 35.3°C로 '따뜻함'에서 '더움' 단계를 나타냈다. 식재량이 증가함에 따라 LAI 2에서 PET 열지각 단계가 1단계 감소하였고, LAI 4에서 최대 2단계까지 감소하는 것으로 나타났다.

LAI 증가에 따른 차이는 식재량 12.5%, 25.0%에서 평균 0.3°C, 식재량 47.5%에서 0.6°C, 식재량 100%에서 1.2°C로 LAI 증가에 따른 차이는 적은 것으로 나타났다. 하지만 이는 양지의 값이 포함되어 있기 때문에 실제 LAI 증가에 따른 차이는 보다 더 클 것으로 사료된다.

Table 8. Mean values of air temperature, relative humidity, wind speed, mean radiant temperature and PET of scenarios

Air temperature		H7W5L2				H7W5L4			
Planting rate (%)	12.5	25.0	47.5	100.0	12.5	25.0	47.5	100.0	
Coverage rate (%)	6.4	13.0	23.5	52.0	6.4	13.0	23.5	52.0	
10:00	30.2	30.2	30.2	30.2	30.1	30.1	30.1	30.1	
11:00	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.5	31.5	31.4	
12:00	31.7	31.7	31.7	31.7	31.6	31.6	31.5	31.4	
13:00	31.6	31.6	31.5	31.5	31.5	31.5	31.4	31.2	
14:00	31.9	31.9	31.9	31.8	31.8	31.7	31.6	31.4	
15:00	32.4	32.4	32.4	32.4	32.3	32.3	32.1	31.8	
16:00	32.0	32.0	32.0	32.0	31.9	31.8	31.7	31.4	
Mean	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.5	31.4	31.2	

Table 8. Continue

Relative humidity		H7W5L2				H7W5L4			
Planting rate (%)	12.5	25.0	47.5	100.0	12.5	25.0	47.5	100.0	
Coverage rate (%)	6.4	13.0	23.5	52.0	6.4	13.0	23.5	52.0	
10:00	62.1	62.1	62.2	62.2	62.1	62.2	62.3	62.6	
11:00	59.0	59.0	59.0	59.1	59.1	59.1	59.3	59.6	
12:00	58.0	58.0	58.1	58.1	58.0	58.2	58.4	58.9	
13:00	60.8	60.8	60.9	60.9	60.8	61.1	61.5	62.2	
14:00	61.0	61.0	61.0	61.1	61.0	61.4	62.1	63.0	
15:00	61.1	61.1	61.1	61.1	61.2	61.6	62.3	63.4	
16:00	58.1	58.1	58.1	58.1	58.3	58.6	59.1	60.3	
Mean	60.0	60.0	60.0	60.1	60.1	60.3	60.7	61.4	

Table 8. Continue

Wind speed	H7W5L2				H7W5L4			
Planting rate (%)	12.5	25.0	47.5	100.0	12.5	25.0	47.5	100.0
Coverage rate (%)	6.4	13.0	23.5	52.0	6.4	13.0	23.5	52.0
10:00	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
11:00	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6
12:00	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8
13:00	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8
14:00	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6
15:00	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4
16:00	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3
Mean	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6

Table 8. Continue

Mean radiant temperature		H7W5L2				H7W5L4			
Planting rate (%)	12.5	25.0	47.5	100.0	12.5	25.0	47.5	100.0	
Coverage rate (%)	6.4	13.0	23.5	52.0	6.4	13.0	23.5	52.0	
10:00	58.5	55.6	50.9	41.6	58.1	54.9	49.5	38.9	
11:00	59.8	57.6	54.1	45.6	59.5	57.0	52.9	43.4	
12:00	58.8	56.5	52.9	45.8	58.6	56.1	52.0	44.0	
13:00	59.3	57.7	54.0	48.2	59.1	57.3	53.2	46.4	
14:00	60.9	58.6	53.1	49.5	60.7	58.1	52.0	47.2	
15:00	61.2	58.0	53.8	43.8	60.9	57.3	52.4	41.2	
16:00	61.7	58.6	52.8	44.9	61.2	57.6	51.1	41.7	
Mean	60.0	57.5	53.1	45.6	59.7	56.9	51.9	43.2	



Table 8. Continue

PET	H7W5L2				H7W5L4			
Planting rate (%)	12.5	25.0	47.5	100.0	12.5	25.0	47.5	100.0
Coverage rate (%)	6.4	13.0	23.5	52.0	6.4	13.0	23.5	52.0
10:00	41.0	39.7	37.6	33.7	40.6	39.2	37.0	32.6
11:00	42.5	41.5	39.9	36.4	42.2	41.2	39.4	35.4
12:00	41.7	40.7	39.2	36.3	41.5	40.5	38.8	35.5
13:00	41.8	41.1	39.6	37.2	41.6	40.9	39.1	36.2
14:00	43.1	42.1	39.7	38.2	43	41.8	39.1	36.9
15:00	44.3	42.8	40.9	36.7	44.1	42.4	40.1	35.2
16:00	44.2	42.7	40.1	36.7	43.9	42.2	39.2	35.0
Mean	42.7	41.5	39.6	36.5	42.4	41.2	39.0	35.3

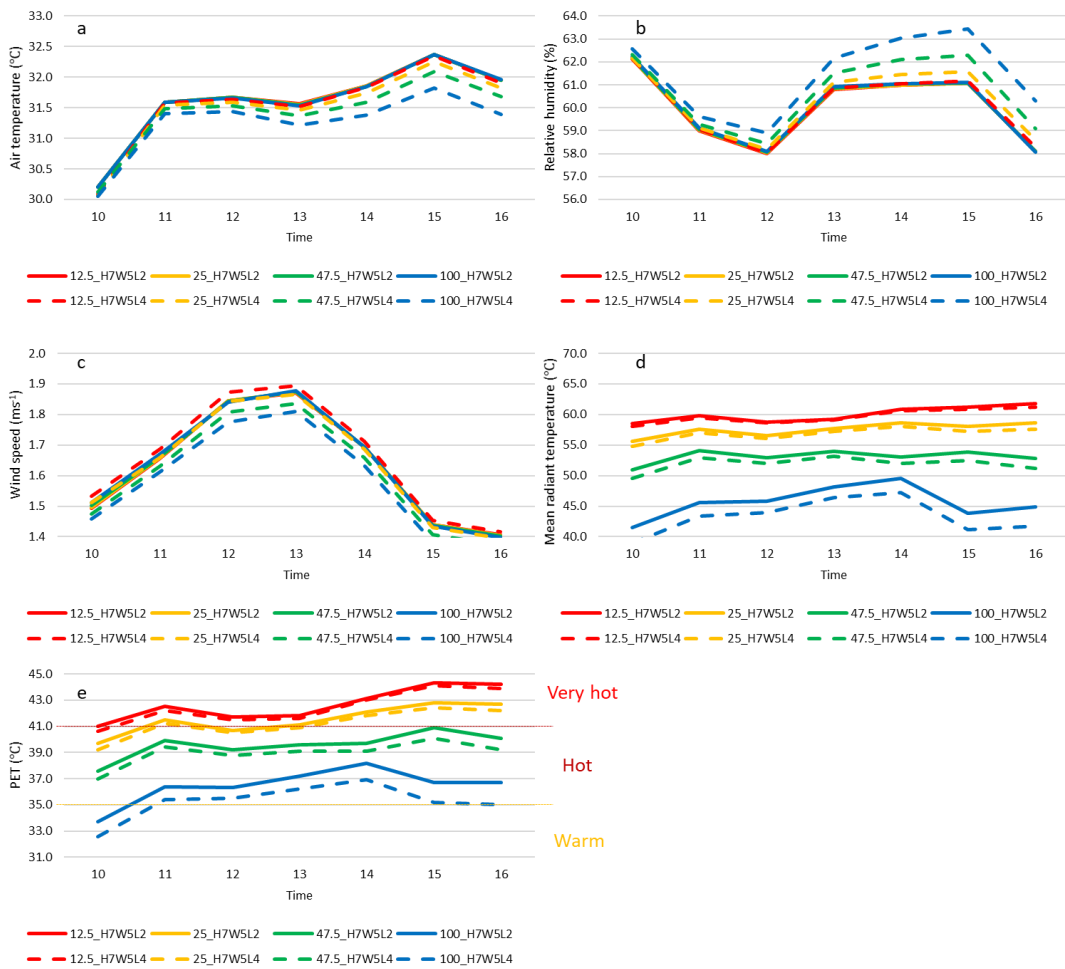


Figure 7. Microclimate results for tree planting area mean values by planting rates (a: air temperature, b: relative humidity, c: wind speed, d: mean radiant temperature, e: PET)

## IV. 결론

본 연구는 제주시 일도이동에 위치한 느티나무의 미기후 실측자료와 ENVI-met 결과값을 비교검증한 뒤, 수목의 수형, 지엽밀도, 식재량에 따른 열환경을 분석하였다.

그 결과, 원정형의 수형에서 가장 큰 열환경 저감효과가 나타났다. 삼각형의 수형보다 역삼각형의 수형이 더 큰 열환경 저감효과를 보였으나, 수목의 수고가 높을 경우 그 차이는 줄어드는 것으로 나타났다. 수목의 지엽밀도는 높을수록 더 큰 열환경 저감효과를 보이며, 일정 수치 이상에서는 저감효과의 증가가 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나, 실제 국내서 사용되는 수목의 지엽밀도는 일반적으로 6을 넘지 않기 때문에 지엽밀도가 높은 수목을 사용하는 것이 열환경 저감에 효과적일 것이다. 수목의 식재량 또한 마찬가지로 높을수록 더 큰 열환경 저감효과가 나타났다. 식재량의 증가에 비례하여 열환경 저감효과가 증가하였고, 수목의 지엽밀도가 높을수록 열환경 저감효과의 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

수목의 수형, 지엽밀도, 식재량의 모든 경우에서 변수별로 미기후 요소 중 기온, 상대습도, 풍속의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 열환경에 가장 큰 영향을 미치는 미기후 요소인 평균복사온도의 저감이 열환경 개선에 가장 효과적인 방법이다.

본 연구에서는 수목의 수형, 지엽밀도, 식재량이 열환경에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연구가 진행되었으나, 수형을 원정형, 삼각형, 역삼각형의 3가지 밖에 포함시키지 못하였고, 더 다양한 수형의 분석이 필요하다. 또한, 수목의 효과를 확인하기 위하여 건물과 포장재 등의 열환경에 영향을 미치는 요소를 배제하여 진행하였는데, 실제 공간 구성에 적용하기 위해서는 건물과 포장재 등의 요소들을 복합적으로 고려하여 분석할 필요가 있다.

## V. 초록

본 연구에서는 수목이 열환경에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 수목의 수형, 지엽밀도, 식재량의 세가지 관점에서 수목의 열환경 저감 효과를 분석하였다. 수목의 수형은 원정형, 삼각형, 역삼각형의 세가지를 이용하였다. 기온, 상대습도, 풍속에서 수형별 차이는 미미하였으나, 평균복사온도는 원정형의 수형에서 가장 큰 열환경 저감효과가 나타났다. 수목의 지엽밀도는 높을수록 더 큰 열환경 저감 효과를 보이며, 일정 수치 이상에서는 저감효과의 증가가 줄어드는 것으로 나타났다. 수목의 식재량은 100.0%에서 12.5%까지 식재량을 반감하는 방식으로 식재량을 결정하였고, 지엽밀도를 2와 4로 설정하여 두가지의 수목을 이용하여 분석하였다. 수목의 식재량이 많을수록 더 큰 열환경 저감효과가 나타났다. 지엽밀도가 높을수록 저감효과의 차이는 더 크게 나타났다. 재량의 증가에 따라 평균복사온도가 평균 14.4~16.5℃의 차이가 나타났으며, 인간 열환경지수 PET에서 '매우 더움'단계에서 '더움'단계로 최대 2단계 차이가 나타났다. 수목의 수형, 지엽밀도, 식재량 모두 기온, 상대습도, 풍속의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 평균복사온도를 저감시키는 것이 열환경 개선에 가장 효과적이다.

## Reference

- Korea Disease Control and Prevention Agency (2021) Analysis of heat-related illness surveillance in 2021, 14(46): 3251–3263
- Abreu-Harbich, L. V., L. C. 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. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.02.008
- Cheung, P. K. and C. Y. Jim (2018) Comparing the cooling effects of a tree and a concrete shelter using PET and UTCI. *Building and Environment*, 130: 49–61
- Colter, K. R., A. C. Middel and C. A. Martin (2019) Effects of natural and artificial shade on human thermal comfort in residential neighborhood parks of Phoenix, Arizona, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126429
- Denzere, M., K. Oleson, A. M. Coutts, G. Pigeon and N. P. M. van Lipzig (2013) Simulating the surface energy balance over two contrasting urban environments using the community land model urban. *International Journal of Climatology*, 33(15): 3182–3205
- Estoque, R. C., Y. Murayama and S. W. Myint (2017) Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 577: 349–359
- Fanger, P. O. (1972) *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill, New York, pp.244
- Giridharan, R., S. Ganesan and S. S. Y. Lau (2004) Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36: 525–534. DOI: 10.1016/j.enbuild.2003.12

- Höppe, P. (1999) The physiological equivalent temperature — a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43: 71–75
- Huang, K., X. Li, X. Liu and K. C. Seto (2019) Projecting global urban land expansion and heat island intensification through 2050. *Environmental Research Letters*. 14, 114037
- Hwang, R., T. Lin and A. Matzarakis (2011) Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 46: 863–870. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.10.017
- Jo, S. (2018) Analysis of the influence of street tree and single tree on human thermal sensation in summer. Master thesis, Jeju National University
- Kikon, N., P. Singh, S. K. Singh and A. Vyas (2016) Assessment of urban heat islands (UHI) of Noida City, India using multi-temporal satellite data. *Sustainable Cities and Society*, 22: 19–28
- Lin, B., Y. Cho and C. Hsieh (2021) Study of the thermal environment of sidewalks within varied urban road structures. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127137. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127137
- Lin, B. and C. Lin (2016) Preliminary study of the influence of the spatial arrangement of urban parks on local temperature reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20: 348–357. DOI: 10.1016/j.ufug.2016.10.003
- Matzarakis, A. and H. Mayer (1999) Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2): 76–84
- Morakinyo, T. E. and Y. F. Lam (2016) Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment*, 103: 262–275. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.04.025

- Morakinyo, T. E., L. Kong, K. K. Lau, C. Yuan and E. Ng (2017) A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 115: 1-17. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.01.005
- Morakinyo, T. E., W. Ouyang, K. K. Lau, C. Ren, and E. Ng (2020) Right tree, right place (urban canyon): tree species selection approach for optimum urban heat mitigation – development and evaluation. *Science of the Total Environment*, 719, 137461
- Park, S. (2012) Landscape planning and design methods with human thermal sensation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 40(1): 1-11
- Paul, C. and L. Larissa (2014) How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat islands in Chicago. *Landscape and Urban Planning*, 125: 117-129. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.02.019
- Rahman, M. A., L. Hartmann, A. Moser-Reischl, M. F. von Strachwitz, H. Paeth, H. Pretzsch, S. Pauleit and T. Rötzer (2020) Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107947
- Sodoudi, S., H. Zhang, X. Chi, F. Müller and H. Li (2018) The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34: 85-96. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.06.002
- Sun, S., X. Xu, Z. Lao, W. Liu, Z. Li, E. H. García and J. Zhu (2017) Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on thermal comfort in hot summer by numerical simulation. *Building and Environment*, 123: 277-288

- Tumini, I. and C. Rubio–Bellido (2016) Measuring climate change impact on urban microclimate study of Concepción. *Procedia Engineering*, 161: 2290–2296. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.830
- van Hove, L. W. A., C. M. J. Jacobs, B. G. Heusinkveld, J. A. Elbers, B. L. van Driel and A. A. M. Holtslag (2015) Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment*, 83: 91–103. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.029
- Zhou, W. and F. Cao (2020) Effects of changing spatial extent on the relationship between urban forest patterns and land surface temperature. *Ecological Indicators*, 109, 105778