

도시 가로수의 증산 작용으로 인한 불쾌지수 변화 분석*

윤석환¹⁾ · 이동근²⁾ · 박채연³⁾

¹⁾ 서울대학교 협동과정 조경학 학생 · ²⁾ 서울대학교 조경지역시스템공학부 교수 ·

³⁾ 일본국립환경연구소 사회환경시스템연구센터 연구원

Analyzing Change of Discomfort Index for Transpiration of Street Tree*

Yun, Seok-Hwan¹⁾ · Lee, Dong-Kun²⁾ and Park, Chae-Yeon³⁾

¹⁾ Interdisciplinary program in Landscape Architecture,
Seoul National University, Seoul, South Korea, Student,

²⁾ Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering,
Seoul National University, Seoul, South Korea, Professor,

³⁾ Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute for Environmental Studies,
Tsukuba, Japan, Research Associate.

ABSTRACT

Thermal environment of city is getting worse due to severe urban heat island caused by climate change and urbanization. The cooling effect of street tree is regarded as a effective way to ameliorate the urban heat environment. The effect is largely made up of shadow formation and transpiration. This study aims to identify how the transpiration affects the discomfort index by analyzing comprehensive impact of the transpiration on the air temperature and relative humidity. The changes in the amount of transpiration, air temperature, and relative humidity were estimated for Seogyo-dong area which has a lot of floating population in Seoul, at 2 p.m. in dry day in July and August. On average, the transpiration of the street tree decreased the temperature 0.3°C and increased the relative humidity 2.6% in an hour. As a result of these changes in temperature and humidity, the discomfort index rose mostly(0.036 on average). It was always get rise especially on the day when the discomfort index was above 80(0.05 on average). However, compared with the significant change in temperature and humid-

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(RE202001064)

First author : Yun, Seok-Hwan, Interdisciplinary program in Landscape Architecture, Seoul National University, Student,
Tel : +82-2-880-4885, Email : ysw330616@snu.ac.kr

Corresponding author : Lee, Dong-Kun, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Professor,
Tel : +82-2-880-4875, Email : dklee7@snu.ac.kr

Received : 31 July, 2020. **Revised** : 16 October, 2020. **Accepted** : 13 October, 2020.

ity, the variation of the discomfort index itself was very slight(up to 0.107). Therefore, the effect of transpiration by the street trees might not be effective in the planning to improve the thermal environment(especially on the day when the discomfort index is high). It is necessary to select the species of trees and planting location considering the cooling effect of shade formation synthetically.

Key Words : *Urban heat island, Tree planning, Urban tree, Urban canopy model, Thermal comfort, Cooling effect*

I. 서 론

도시 열섬(Urban heat island) 현상은 도심 지역이 주변 지역보다 열을 더 발생시키고 보존하여 더 높은 온도를 갖게 되는 현상을 말하고, 도시민의 폭력성을 높이는 등 건강과 생활에 직접 및 간접적으로 영향을 미치고 있다(O'Loughlin et al. 2012). 이러한 도시의 열섬 현상은 도시화와 기후변화로 인해 더욱 심각해지고 있다(Hoffmann et al. 2012; Parker 2010; Radhi et al. 2013)

도시의 열섬 문제를 해소하기 위한 대표적인 방법 중 한 가지는 수목의 냉각 효과이다(Armson et al. 2012; Block et al. 2012; Konarska et al. 2014; Konarska et al. 2016; Tan et al. 2016; Wang & Akbari, 2016; Gunawardena et al. 2017). 수목의 냉각 효과는 복사열 저감과 증산 작용으로 구분할 수 있다(Mirzaei & Haghighat 2010; Rahman et al. 2018). 복사열 저감이란, 수목이 복사열을 차단하거나 반사함으로써 도시의 표면으로 도달하는 복사열을 줄이는 것을 의미한다(Akbari, 2002; Tan et al. 2016). 복사열 저감 작용은 그림자를 발생시켜 특히 수목 아래의 공간을 냉각하는데 효과적이다(Lin & Lin, 2010). 또한, 아스팔트나 콘크리트와 같은 불투수피복보다 수목의 표면 온도가 낮아서 발산하는 장파복사열도 낮아지게 된다(Taha, 1997). 위와 같은 복사열 감소 작용은 최종적으로 온도를 낮춰주는 역할을 한다. 증산 작용이란 뿌리를 통해 흡수한 물을 식물 잎의 기공을 통해 대기로 내보내는 과정으로(Campillo et

al. 2012) 잠열을 증가시킴으로써 도시 현열을 감소시키는 것을 말한다(Ballinas & Barradas, 2016). 이 두 가지 작용은 도시 열을 완화하는 데 중요한 역할을 한다(Ballinas & Barradas, 2016; Wang & Akbari, 2016; Kim & Coseo, 2018).

수목의 냉각 효과는 도시의 온도를 낮춤으로써 여름철 열 환경을 개선시킨다. 그러나 수목의 증산작용은 온도를 낮추는 효과가 있을 뿐만 아니라 수증기를 배출하여 습도를 올리게 된다. 온난 습윤한 우리나라의 여름철에는 증가된 습도가 오히려 열 환경을 악화시킬 수 있다. 한국에서 열 환경을 주로 나타내는 불쾌지수를 평가할 때 상대 습도는 열 쾌적성에 영향을 줄 수 있는 중요한 환경 요소이며, 습도가 높으면 불쾌함을 느낄 수 있다(Jing et al. 2013). 우리나라의 여름철 열 환경을 고려하기 위해서는 온도와 습도 모두 고려해야 하지만 수목의 증산 작용이 종합적으로 열 환경에 어떤 영향을 미치는지에 대해서는 연구된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 여름철 기간 동안 수목의 증산 작용이 열 환경을 나타내는 불쾌지수에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 위하여 수목의 증산 작용을 물리적으로 계산할 수 있는 수문학적 순환 모델을 이용하여 증산량을 계산하였으며(Fatichi, 2010; Fatichi et al. 2012), 가정된 공간에서의 온도 및 습도의 변화량을 분석하였고, 최종적으로 가로수의 증산 작용이 불쾌지수에 끼치는 영향을 확인하였다(Figure 1). 본 연구는 우리나라와 같은 기후에서 가로수의 증산 작용이 열 환경에 어떤 영향

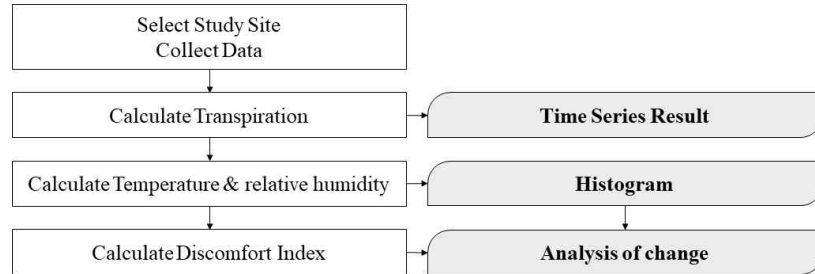


Figure 1. Study flow

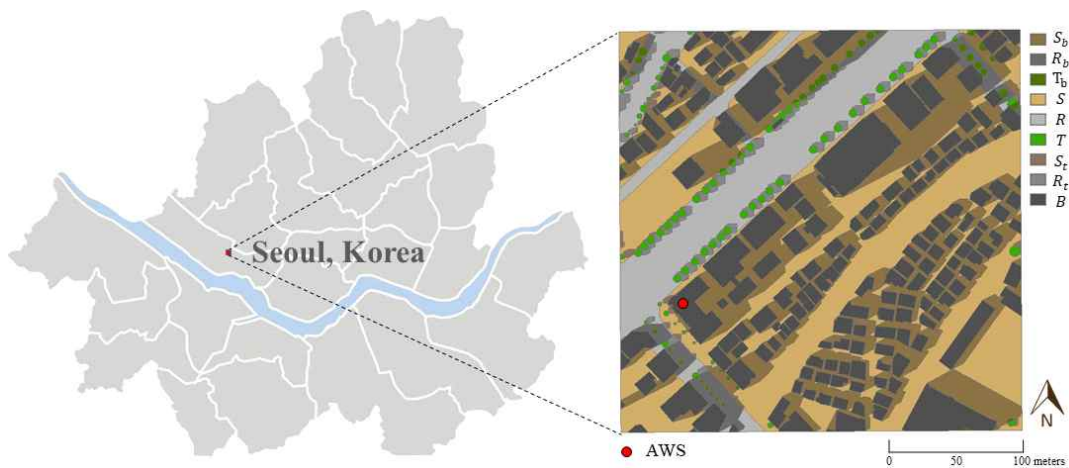


Figure 2. Key map of study site at 2 p.m. (B: Building, S: Street, Sb: Street shaded by building, St: Street shaded by tree, R: Road, Rb: Road shaded by building, Rt: Road shaded by tree, T: Street tree, Tb: Tree shaded by building)

을 미치지 종합적으로 파악하는데 도움이 될 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 연구의 범위

1) 공간적 범위

본 연구는 서울시 가로수의 증산 효과를 산정하기 위하여 서울의 서교동과 관교동에 걸쳐있는 홍대입구역 근처 300×300m² 지역을 연구의 대상지로 선정하였다(Figure 2). 홍대입구역은 2016년 기준, 지하철 단일 역사 중 승하차인원이 가장 많은 역 2위, 승하차인원이 가장 많이 증가한 역 1위를 기록한역으로(Seoul 2017), 서

울에서 유동인구가 매우 높은 곳이기 때문에 도시 열 환경이 중요한 지점이라고 할 수 있다. 도로 옆을 따라 80여 그루의 가로수가 심어져 있으며 이 수목의 85%는 서울시에서 가장 높은 비율로 식재된 은행나무이기 때문에 대상지로 적절하다 할 수 있다(Seoul, 2018). 평균 수관 폭은 다소 서울시 은행나무의 평균값인 3.92m보다 큰 5.37m이지만, 평균 수고는 8.27m로 서울시 은행나무 평균값인 8.41m과 유사하기 때문에 대상지로 선정되었다. 물리적으로 증산량을 계산하는 방법은 수목의 종과 규모에 따라 매우 복잡해지기 때문에 본 연구에서는 대상지 내의 수목의 특성을 단순화시켜 계산하였다. 수목은 하나의 수종과 하나의 규격으로 통일하였으며,

수종은 대상지의 85%에 해당하는 은행나무로 지정하였다. 잎의 너비는 7.5cm로 설정하였다 (Kumar, 2010).

Table 1. Statistics of tree properties (Study site)

Variable	Min	Max	Mean	S.D
Tree height	5	14	8.28	2.32
Width of crown	2	9	5.37	2.28

2) 시간적 범위

본 연구는 최근 여름철 도시 열 환경을 반영하기 위하여 2018년 7월, 8월의 오후 2시를 시간적 범위로 선정하였다. 한국의 2018년 여름은 서울 39.6°C, 기상 관측 시작 이래 111년 만에 일 최고기온 극값 1위이고, 1973년 이래 전국 평균 최고기온, 폭염일수 1위로 기록적인 폭염이 한반도를 덮친 년도이다. 7, 8월은 한국에서

불쾌지수가 가장 높은 시기이고, 그 중에서 오후 2시는 하루 중 불쾌지수가 가장 높은 시기이다 (Kim, 1999; Jang et al. 2012).

비가 온 날은 낮은 온도로 인해 도시 열 환경이 문제가 되지 않기 때문에, 본 연구에서 비가 오는 날은 제외하였다.

2. 수목의 증산량 산정

수목의 증산량은 수문학적 수문 모델을 기초로 산정하였으며 이를 산정하기 위해서는 다양한 기상 자료가 필요하다. 우선 증산량 산정에 필요한 입력자료 구축에 대해 설명한 뒤, 수문학적 순환모델로 증산량을 산정하는 방법을 설명하였다. 이 과정에는 많은 매개변수가 사용되는데, 불쾌지수 산정에 쓰이는 매개변수와 함께 Table 2에 정리하였다.

1) 입력자료 구축

Table 2. A list of parameters used in transpiration(①) and discomfort index(②)

Parameter	Description	Units	Usage
R_s	Solar radiation quantity	$[MJm^{-2}h^{-1}]$	①
T_{dp}	Dew point	$[^{\circ}C]$	①/②
T_v	Transpiration fluxes from vegetation	$[kgm^{-2}h^{-1}]$	①/②
T_s	Leaf surface temperature	$[^{\circ}C]$	①
ρ_a	Air density at leaf boundary layer	$[kgm^{-3}]$	①
$q_{sat}(T)$	Specific humidity at saturation at a temperature, T	$[-]$	①
q_a	Specific humidity of air at the reference height	$[-]$	①
r_{aw}	Aerodynamic resistance to vapor flux	$[sm^{-1}]$	①
r_{ah}	Aerodynamic resistance to heat flux	$[sm^{-1}]$	①
r_b	Leaf boundary layer resistance	$[sm^{-1}]$	①
r_s	Stomatal resistance	$[sm^{-1}]$	①
e_{sat}	Saturated air vapor pressure	$[Pa]$	①
e_a	Air vapor pressure	$[Pa]$	①
z_{oh}	Roughness length for heat flux	$[m]$	①
z_{om}	Roughness length for momentum	$[m]$	①
d	Zero-plane displacement height	$[m]$	①
$u(H_c)$	Wind speed at a canopy height	$[ms^{-1}]$	①
DI	Discomfort index	$[-]$	②
T_{lat}	Latent heat from transpiration	$[kcalh^{-1}]$	②
m_{air}	Mass of the air	$[kg]$	②
ρ_{air}	Air density	$[kgm^{-3}]$	②
V_{area}	Volume of site	$[m^3]$	②
SVD	Saturated vapor density	$[gm^{-3}]$	②

Table 3. Meteorological data, tree properties for input data

Input data	Parameter	Units	Range
Air temperature	T_{air}	[°C]	24.0-37.1
Wind speed	u_a	[ms ⁻¹]	1.5-5.0
Relative humidity	RH	[%]	37.0-83.6
Air pressure	P_{atm}	[Pa]	99098-100826
Cloud cover	CF	[-]	0-10
Leaf area index	LAI	[-]	3.985
Canopy height	H_c	[m]	8.28
Leaf width	d_{leaf}	[cm]	7.5

증산량 계산을 위해 필요한 기상자료 중 대기 온도(T_{air}), 풍속(u_a), 상대습도(RH), 기압(P_{atm}) 자료는 대상지 내에 있는 AWS(Automatic Weather Station)의 값을 사용하였다. 기상 측정 높이(z_{atm})는 본 연구에서 활용하는 AWS 자료의 높이로 29m이다. 이 외에 운량(cf) 자료는 기상청에서 제공하는 서울의 운량(CF) 자료를 사용하였다. 입력 자료의 종류와 범위는 Table 3과 같다.

일사량은 단파복사 모형을 통해 시간과 날짜, 위치에 따라 변화되는 태양 상수를 활용하여 지구 대기권 내의 단파복사량을 산정하여 사용하였다(Allen et al. 1998). 이슬점(T_{dp})은 Arden-Buck 식을 이용하여 오차율이 0.05% 이내인 경험 상수 $a = 6.1121 [mb]$, $b = 17.368$, $c = 238.88 [°C]$ 를 이용하여 계산하였다(Buck, 1981)(식 1, 2).

$$T_{dp} = \frac{c\gamma_m(T, RH)}{b - \gamma_m(T, RH)} \quad (1)$$

$$\gamma_m(T, RH) = \ln\left(\frac{RH}{100} e^{\left(b - \frac{T}{d}\right)\left(\frac{T}{c+T}\right)}\right) \quad (2)$$

2) 증산량 산정

식물의 증산량을 계산하기 위해 주로 쓰이는 방법은 Penman-Monteith 방법이다(Allen et al. 1998). Penman-Monteith 방법은 세계식량기구(FAO)에서 Penman FAO-24방법을 개선하여 발표한 것으로 기상자료로부터 잠재증발산량을 산정하거나 다른 방법들을 평가하기 위한 기준

방법으로 이용되고 있다(Hargreaves, 1994). 그러나 이 방법은 도시의 수목이 아닌 작물을 대상으로 고안이 된 것이고, 식물의 특성을 작물 계수 k 하나로 반영하여 도시 수목의 특성을 상세하게 반영하지 못한다는 한계가 있다. 본 연구에서 산정하고자하는 도시 가로수의 증산량을 산정하기 위해서는 수고, 잎의 너비, 엽면적 지수 등을 반영하는 수문학적 순환 모델의 증산량 산정식이 적합하다(Fatichi, 2010). 위 산정식의 주요한 입력 자료는 공기 밀도(p_a), 잎의 표면온도(T_s)에서의 포화상태 비습($q_{sat}(T_s)$), 기상 측정 높이(z_{atm})에서의 비습(q_a), 수증기 수지로의 공기역학 저항(r_{aw}), 잎 경계층 저항(r_b), 기공 저항(r_s), 그리고 엽면적 지수(LAI)가 있다. 수목 캐노피의 증산량(T_v) 산정식(식 3)은 아래와 같다.

$$T_v = 3600 \times \frac{p_a(q_{sat}(T_s) - q_a)}{r_{aw} + \frac{r_b}{LAI} + \frac{r_s}{LAI}} \quad (3)$$

잎의 표면온도(T_s)는 Park et al. (2018)의 MMRT(Multilayer Mean Radiant Temperature) model를 이용해 산정하였고, MMRT모델의 입력 자료는 대기 온도, 이슬점, 일사량, 풍속, 운량, 그리고 상대습도가 사용되었다.

공기 밀도는 보일-샤를의 법칙과 비기체 상수

[$J/(kg K)$], 기압으로 구했으며 다음과 같이 표현된다(식 4).

$$p_a = \frac{P_{atm}}{287.058(T_s + 273.15)} \quad (4)$$

포화상태의 비습($q_{sat}(T_s)$)과 기상 측정 높이에서의 비습(q_a)은 아래의 식(식 5)으로 계산되었고(Fatichi, 2010), 이 과정에서 필요한 포화수증기압(e_{sat})은 Arden-Buck equation(식 7)으로 계산하였고(식 6) 증기압(e_a)은 포화수증기압과 상대습도로 계산하였다(Buck, 1996).

$$q_a = 0.622e_a / (P_{atm} - 0.378e_a) \quad (5)$$

$$e_a = e_{sat} RH / 100 \quad (6)$$

$$e_{sat} = 100 \times 6.1121e^{\left(\frac{18.678 - \frac{T_s}{234.5}}{\frac{T_s}{257.14 + T_s}}\right)} \quad (7)$$

본 연구에서는 증산량 계산에 필요한 수증기의 공기역학 저항(r_{aw})은 열 플럭스의 공기역학 저항(r_{ah})과 같다고 가정하여 계산하였다(식 8). 이 가정은 매우 일반적이며 많은 지표면 모델과 수문학 모델에서 사용되었다(Viterbo & Beljaars, 1995; Sellers et al. 1996; Noilhan & Mahfouf, 1996; Ivanov et al. 2008; Fatichi, 2010). 열 플럭스의 공기역학 저항 계산은 Monin-Obukhov (M-O) similarity theory를 선행 연구에서 단순화하여 제안된 식을 사용하였다(Mascart et al. 1995). 이 식(식)은 ISBA model에도 활용되었고(Noilhan & Mahfouf, 1996), Similarity theory는 경계층 기상학에서 광범위하게 사용되고(Stull, 1988), 비선형적이고 반복이 매우 많이 요구되기 때문에 많은 연구에서 단순화하여 사용되었다(Louis, 1979; Launiainen, 1995; Mascart et al. 1995; Abdella & McFarlane, 1996; van den Hurk & Holtslag, 1997; Liu et al. 2007). 공기역학 저항은 Karman 상수($k=0.4$), 기상 측정 높이(z_{atm}), 측정 높이의

풍속(u_a), 영면변위(zero plane displacement, d), 모멘텀 거칠기 높이(z_{om}), 열 거칠기 높이(z_{oh})로 계산되며 구하는 식은 다음과 같다(식 9-12).

$$r_{aw} = r_{ah} \quad (8)$$

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u_a} \left[\ln\left(\frac{z_{atm} - d}{z_{om}}\right) \right] \left[\ln\left(\frac{z_{atm} - d}{z_{oh}}\right) \right] \quad (9)$$

$$z_{om} = 0.123 H_c \quad (10)$$

$$z_{oh} = 0.1 z_{om} \quad (11)$$

$$d = 0.67 H_c \quad (12)$$

여기서 수목의 높이(H_c)는 대상지의 은행나무 평균 수고 8.28m가 입력되었다.

잎 경계층 저항(r_b)은 수목 높이에서의 풍속($u(H_c)$)과 잎 경계 전도도(g_b)로 계산되며 구하는 과정(Choudhury & Monteith, 1988; Fatichi, 2010)은 다음과 같다(식 13-15).

$$r_b = 1 / (g_b LAI) \quad (13)$$

$$g_b = \left(\frac{2a}{\alpha'} \right) \left(\frac{u(H_c)}{d_{leaf}} \right)^{1/2} [1 - e^{-\alpha'/2}] \quad (14)$$

$$u(H_c) / u_a = \ln\left(\frac{H_c - d}{z_{om}}\right) / \ln\left(\frac{z_{atm} - d}{z_{om}}\right) \quad (15)$$

본 연구에서 엽면적 지수(LAI)는 은행나무에 해당하는 3.985(Kimm & Ryu, 2015)를 잎의 너비(d_{leaf})는 7.5가 입력되었다(Kumar, 2010). 두 가지 상수 a , α' 가 선행 연구에서 민감도 분석을 통해 제안된 값 $a=0.01$, $\alpha'=3$ 이 사용되었다(Choudhury & Monteith, 1988).

기공 저항은 비선형 방정식을 풀어야 하기 때문에 본 논문은 계산의 단순화를 위하여 물이 충분하다는 조건의 100으로 설정하였다(Allen et al. 1998).

이를 통해 계산된 증산량은 1초 동안의 단위 시간당 증산량이기 때문에 1시간 동안의 대상지에 있는 모든 수목의 증산량($T_{total}[kg h^{-1}]$)을

분석하기 위하여 다음과 같이 계산하였다(식 16).

$$T_{total} = T_v \times 3600 \times A \quad (16)$$

여기서 $A[m^2]$ 는 도메인에서의 수목이 차지하는 면적이다.

3. 불쾌지수 변화량 산정

1) 불쾌지수 산정

열 환경을 나타내는 지수 중에서 불쾌지수(discomfort index)는 더위의 체감 정도를 기온과 습도만으로 산출하는 생활기상지수로, 가장 많이 사용되는 기상지수 중 하나이다(Kim, 1999; Jang et al. 2012). 불쾌지수는 온도, 습도, 풍속 등 여러 조건에서 인간이 느끼는 쾌적한 만족도 또는 불쾌한 정도나 스트레스를 수치화한 것이다. 그 중 한국에서 사용하는 불쾌지수는 미국의 기후 학자 톰이 개발해낸 지수로 기온과 습도를 이용해 계산하고 있다(Thom, 1957; Jang et al. 2012; 기상청). 기상청에서 사용 중인 불쾌지수 체감 정도에 따르면 불쾌지수가 80 이상이면 모든 사람이 불쾌감을 느끼게 된다(Korea Meteorological Administration).

불쾌지수(Discomfort index, $D.I$)를 계산하는 식(식 17)은 다음과 같다(Thom, 1957).

$$D.I = \frac{9}{5} T_{air} - 0.55(1 - RH) \left(\frac{9}{5} T - 26 \right) + 32 \quad (17)$$

본 연구에서는 수목의 증산 작용의 영향을 보기 위한 것이므로, 증산 이전의 온도(T_{air})와 상대습도(H)으로 계산한 값과 증산 이후의 온도($T_{air} - TRIANGLET$)와 상대습도($H + TRIANGLEH$)으로 계산한 값을 비교하였다. 이를 위해 먼저 변화된 온도와 상대습도를 산정하였다(산정 방법은 다음 문단에 서술).

2) 증산량을 이용한 온도 변화 산정

수목의 증산 작용으로 인한 온도와 상대습도

변화를 산정하기 위하여 $300 \times 300 m^2$ 도메인의 z 축 방향의 높이를 거칠기 층(Roughness layer)으로 대상지의 평균 수고 높이의 2배인 16.56m를 공간적 범위로 선정하였다. 실제로는 공기가 대류에 의해 계속 이동을 하지만, 본 연구에서는 증산량이 온도와 습도에 미치는 영향을 확인하기 위해서 공간적 범위 밖으로의 공기 이동이 없다고 가정하였다. 거칠기 층(Roughness layer)은 다른 말로 전이층(Transition layer)으로 공간요소들 꼭대기의 높이나 간격의 1~3배까지의 대기층이고, 이 구역에서 에너지 흐름은 건물이나 수목의 개별적인 거칠기 특성들에 강하게 영향을 받는 매우 불규칙적인 층이다(Oke, 1987). 따라서 본 연구에서는 공간적 범위 내에서 위치에 따라 온도의 차이가 없다고 가정하였고, 증산 작용으로 인한 온도 저감 효과도 전체 공간에 확산이 되었다는 전제로 계산하였다.

수목의 증산 작용으로 인한 온도 변화를 구하기 위하여 증산량(T_{total})을 잠열량 T_{lat} 으로 계산하였다(식 18).

$$T_{lat} = 600 T_{total} \quad (18)$$

수목의 증산 작용으로 인한 시간당 기온의 변화(ΔT [$^{\circ}C/hour$])는 공기의 비열($C_{air}=1$), 질량(m_{air}), 공기의 밀도(p_{air}), 대상지의 부피(V_{area})로 계산이 가능하다(식 19-21).

$$TRIANGLET = \frac{T_{lat}}{C_{air} m_{air}} \quad (19)$$

$$p_{air} = \frac{P_{atm}}{287.058(T_{air} + 273.15)} \quad (20)$$

$$m_{air} = p_{air} V_{area} \quad (21)$$

3) 증산량과 온도를 이용한 상대습도 산정

수목의 증산 작용으로 인해 상대습도의 변화를 구하기 위하여 기존의 대기에 포함된 수증기

량에 증산으로 증가된 수증기량을 더하여 변화된 온도에서의 상대습도를 계산하였다. 이를 위해 오차율이 1% 미만인 포화증기밀도[g/m^3] 계산식이 사용되었다(Tomiyama, 1988). 계산은 Figure 3과 같고 자세한 과정은 부록에 있다. 상대습도 또한 대기 온도와 마찬가지로 공간적 범위 내에서 위치에 따른 차이가 없을 것이라 가정하였고, 증산 효과도 전체 공간에 확산이 되었다는 전제로 계산하였다.

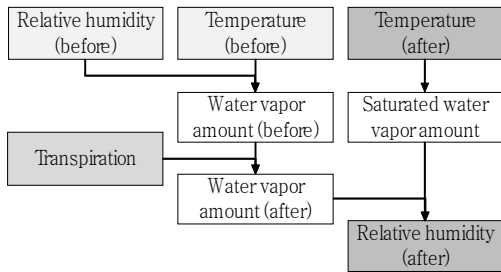


Figure 3. Calculation process of relative humidity

III. 결과 및 고찰

1. 대상지 가로수의 여름철 증산량

2018년 7~8월 중 비가 오지 않는 날의 오후 2시, 서울의 $300 \times 300 m^2$ 지역을 단순화하여 도메인에서 1시간 동안의 증산량(kg/m^2)을 잠열량(W/m^2)으로 변환한 그래프는 Figure 4와 같다.

증산 잠열량 산정 결과는 단위면적당 최소 $1.52W/m^2$ 부터 $8.04W/m^2$ 으로 기상 조건에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 온도와 상대습도 조건(Figure 4(위))에 따라 비교해 보았을 때, 온도가 높을수록, 그리고 상대습도가 낮을수록 증산량이 큰 것을 볼 수 있다. 대상지의 면적 $90,000m^2$ 에 비해 수목의 총면적은 $2,320m^2$ 으로 작기 때문에 전체 영역에서 단위면적당 잠열량은 다소 작은 값으로 산정되었다. 대상지의 전체 영역이 아닌 수목의 단위면적당 잠열량은 $58.97 \sim 311.9W/m^2$ (평균 $186.7W/m^2$)이고 일사량 대비 잠열량의 비율은 31.5%로 이는 Konarska et al. (2016)의 도시 수목의 냉각 효과 연구에서 정오에 측정된 값인 $72 \sim 343W/m^2$ (평균 $206 W/m^2$), 30.2%와 유사한 결과라고 할 수 있다. Konarska et al. (2016)에서 측정 시기의 평균 기온은 $21.2^\circ C$ 로 본 연구의 기온 $31.7^\circ C$ 보다 낮지만, 평균 일사량은 $90W/m^2$ 높고, 수목의 평균

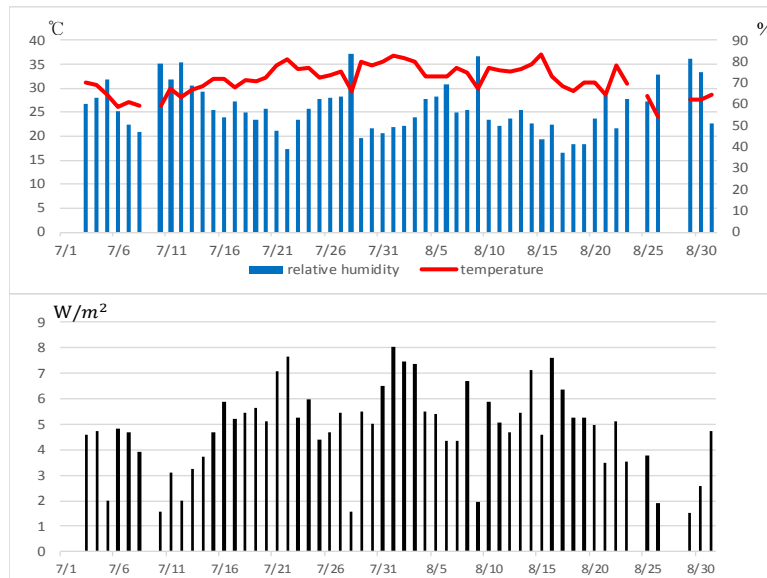


Figure 4. Temperature & relative humidity(up), Latent heat of transpiration(down)

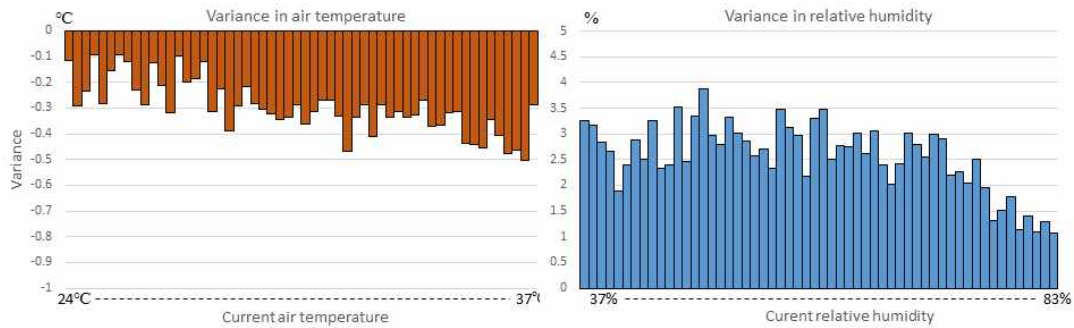


Figure 5. The change of temperature(left), relative humidity(right) by transpiration. Each x axis is the temperature/relative humidity condition of each day from minimum to maximum and each y axis is the air temperature/relative humidity change.

LAI가 4.934로 본 연구의 3.985보다 크다. 또한, 본 연구와 달리 모든 수목이 건물 그림자에 가려지지 않아 온도 차이가 있음에도 불구하고 본 연구의 증산량과 유사한 결과가 나왔을 것으로 사료된다.

2. 가로수 증산을 통한 온도, 습도 변화

수목의 증산 작용으로 인한 온도 및 상대습도의 변화 결과는 Figure 5과 같다.

Figure 5(좌)는 온도가 가장 낮은 날(24°C)부터 가장 높은 날(37°C)까지 온도가 높을수록 증기압 차이($q_{sat}(T_s) - q_a$, 식 4)가 커짐에 따라 증가된 증산량으로 인해 온도가 더 크게 감소하는 것을 보여주고 있다. 가로수의 증산은 대상 시기동안 온도를 평균 0.3°C 감소시켰다. 최소 감소량은 0.1°C로 습도 81.5%, 온도 27.6°C인 날이었으며, 최대 감소량은 0.5°C로 습도 50%, 온도 36.8°C인 날로 나타났다.

Figure 5(우)는 상대습도가 가장 낮은 날(37%)부터 가장 높은 날(83%)까지 상대습도가 높을수록 증기압 차이($q_{sat}(T_s) - q_a$, 식 4)가 작아져서 증산을 적게 하게 될 뿐만 아니라 증산으로 인해 낮아진 온도가 포화수증기압을 작게 낮추게 되어 상대습도가 더 작게 증가하는 것을 볼 수 있다. 가로수의 증산은 대상 시기동안 상대습도를 평균 2.6% 증가시켰으며, 최소 1.1%(습도 83.6%, 온도

29.5°C일 때) 최대 3.9% (습도 50.2%, 온도 32.6°C일 때)정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 온도와 습도가 증산에 유의미한 영향을 주는 것을 볼 수 있지만, 그 밖에도 풍속이 높을수록 증산량이 높아지는 것을 알 수 있었다(부록 참고).

3. 불쾌지수 변화

수목의 증산 작용으로 인한 온도와 습도의 변화를 종합적으로 봤을 때 불쾌지수의 변화량은 Figure 6와 같다.

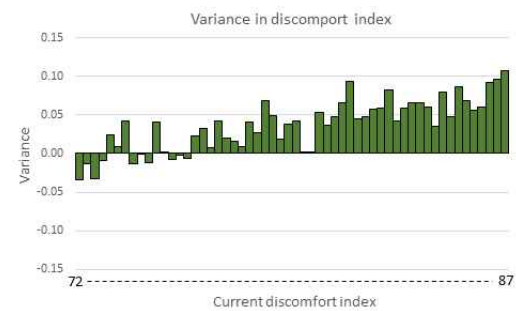


Figure 6. The change of discomfort index(D.I) by transpiration. The X axis is D.I of each day from minimum to maximum. The y axis is D.I change.

Figure 6는 불쾌지수가 가장 낮은 날(72)부터 가장 높은 날(87) 순으로 정렬하여 기존 불쾌지수에 따라 가로수 증산을 통해 불쾌지수가 달라

지는 것을 보여준다. 증산 작용만을 고려하였을 때, 2018년 서울의 7-8월 불쾌지수는 증가하는 날이 더욱 많았다. 특히 기상청에서 제시하는 불쾌지수의 단계의 ‘매우 높음’ 기준인 80보다 큰 날에서는 항상 증가하는 경향을 보였고, 불쾌지수가 높은 날일수록 증가폭 또한 커지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 증산 작용으로 인해 증가한 상대습도로 인해 불쾌지수가 올라갔기 때문이고, 2018년이 폭염일수 1위를 기록한 년도 이기에(재료 및 방법 참고) 더욱 두드러진 결과이다. 그러나 그 증가량도 온도와 상대습도의 변동에 비해서는 작았는데, 불쾌지수가 가장 많이 증가한 3일의 경우 평균 0.1정도 증가하였고, 온도는 평균 약 0.49℃ 감소, 상대습도는 평균 약 3.35% 증가하였다. 온도와 상대습도의 변동에 비해 불쾌지수의 변화량이 작은 이유는 증산으로 인한 온도 감소는 양의 효과를 제공하지만, 상대습도 증가는 음의 효과를 제공하기 때문에 결과적으로 불쾌지수에 영향을 상쇄했기 때문이다. 즉, 수목의 증산 작용은 온도와 습도의 변화량에는 각각 유의미한 변화를 주었지만 이를 종합적으로 나타낸 불쾌지수에서는 그 변화가 매우 미미한 것으로 나타났다(대부분 0.1 이하).

본 연구에서는 증산 작용만을 다루었지만, 수목의 열 저감 효과는 증산뿐만 아니라 복사열 차단을 통한 그림자 형성, 그리고 수목의 다른 요소에 비교해 높은 반사율로 인해 낮은 표면 온도 등이 있다. 수목으로 인한 다른 열 저감 효과까지 고려한다면 감소시키는 온도 값이 크게 증가하여 본 연구의 결과처럼 불쾌지수가 증가하기보다 감소할 수 있을 것이다. 특히 공간적으로 봤을 때, 입사되는 열량이 많고 그로 인해 수목의 표면 온도가 높은 곳일수록 복사열 차단 효과와 증산 작용으로 인한 냉각 효과 모두 커진다(Morris et al. 1957; Rahman et al. 2018). 따라서 수목의 배치를 고려할 때 위와 같은 사실들을 기반으로 열 저감 효과를 극대화할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다.

Rahman et al. (2018)의 연구 결과에 따르면 온도가 높은 날일수록 증산의 냉각 효과보다 수목 그림자로 인한 냉각 효과가 지배적이다. 또한 Shashua-Bar & Hoffman (2000)은 덥고 습도가 높은 지역에서 그림자로 인한 냉각 효과가 80%에 달한다고 하였다. 건조한 기후에서는 그림자 효과가 없는 초지의 경우 증산 작용만으로도 열 스트레스를 감소시킬 수 있다(Shashua-Bar et al. 2011). 그러나 증발된 습기는 습도를 증가시켜 사람의 땀 증발 속도를 줄임으로써 체온 조절을 억제할 수 있게 된다(Gunawardena et al. 2017). 따라서 초지를 포함한 녹지의 증산 작용이 열 환경에 미치는 영향은 기후에 따라서 긍정적인 수도 부정적인 수도 있다. 우리나라처럼 여름철이 온난 습윤할 경우에는 본 연구의 결과처럼 증산 효과는 열 환경에 부정적인 영향을 줄 수 있기 때문에 초지보다는 수목을 심고 그중에서도 엽면적 지수가 큰 수종을 심어 그림자로 인한 냉각 효과를 크게 하는 것이 유리할 것이다(Lin & Lin, 2010).

4. 연구의 한계 및 발전사항

본 연구는 대상지를 단순화하여 진행하였기 때문에 실제 공간과는 다소 차이가 있을 것으로 보인다. 불쾌지수 산정을 위해 공간적 범위 밖으로의 공기의 이동이 없다고 가정하였기 때문에 실제 결과와 차이가 있을 것으로 보인다. 도시의 건물, 교통 등의 다른 요소로 인한 영향을 고려하고 여러 규격의 다양한 수종을 포함한다면 더 나은 결과가 도출될 것이다.

또한, 연구에서 사용한 산정식은 외국에서 개발된 증산량 산정식이기 때문에 한국에 적용하기에 정확하지 않을 수 있다. 그러나 본 연구에서는 증산 작용으로 인해 불쾌지수가 증가 혹은 감소하는 방향성을 볼 수 있다는 점에서 그 의미가 있다. 이후 수목의 증산량에 대해 산정값과 실제 측정량을 비교한다면 불쾌지수의 변화량을 보다 정확하게 산정할 수 있을 것이다.

실제 도시의 가로수는 관리가 잘 안되어 있는 상태에서 생육하고 있기 때문에 증산량을 산정할 때 입력된 기공 저항이 과소평가했을 수 있다. 그러나 실제 기공 저항 값이 더 크다면 증산량은 더욱 감소할 것이고 불쾌지수의 변화량 또한 감소할 것이기 때문에 본 연구 결과에 유의미한 영향을 주지 않을 것으로 보인다.

최종적으로 본 연구에서 진행한 증산으로 인한 냉각 효과와 더불어 수목의 복사열 차단 효과, 증발로 인한 냉각 효과를 추가하여 연구를 진행하고, 도시의 식재 유형별로 효과를 계산한다면 향후 기후변화가 진행되어 더욱 심해질 수 있는 도시 열 문제를 완화하기 위한 식재 계획에 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

VI. 결 론

본 연구는 우리나라 여름철 기간 동안 수목의 증산 작용이 온도, 습도에 미치는 종합적인 영향을 분석하여 이로 인한 불쾌지수의 변화를 분석하였다. 이를 위해 수목의 증산작용을 물리적으로 계산할 수 있는 수문학적 순환 모델을 활용하여 증산량을 산정하였으며, 서울에서 유동 인구가 많은 지역을 대상으로 2018년 비가 오지 않는 7월, 8월 오후 2시의 증산량 및 이를 통한 온습도 변화를 산정하였다.

본 연구를 통해 도시 열 환경에서 수목의 증산 작용으로 인한 불쾌지수의 변화는 매우 미미한 것으로 나타났다. 불쾌지수의 변화는 기상 조건에 따라 감소하거나 증가하였는데 변동 범위는 -0.034부터 +0.107으로, 불쾌지수가 낮은 날일수록 감소하거나 적게 증가하였고 불쾌지수가 높은 날일수록 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 그 값은 기존의 7월, 8월 오후 2시의 불쾌지수 범위인 72-87인 것에 비해 매우 작은 값이기 때문에 불쾌지수에 유의미한 변동을 주지 않는 것으로 보인다. 온도 및 상대습도의 경우 각각 평균 0.3℃, 2.6%, 최대 0.5℃, 3.9%로 일

정 부분 변화를 주었지만 불쾌지수를 산정하는 과정에서 온도와 상대습도의 변화로 인한 영향이 상쇄된 것으로 판단된다.

그동안 가로수의 증산 작용은 대기를 냉각시킴으로써 열 환경에 도움을 줄 것이라고 판단되기 쉬웠다. 하지만 본 연구를 통해 온도 저감뿐만 아니라 습도의 증가 현상을 확인하였고, 이는 기상 조건에 따라 불쾌지수에 긍정적일 수도, 부정적일 수도 있고 큰 영향을 주지 않을 수도 있음을 알 수 있었다. 따라서 열환경 개선을 위해 식재 설계 시에는 증산으로 인한 냉각 효과만 고려하는 것이 아니라, 수목의 복사열 차단 효과, 증발로 인한 냉각 효과를 종합적으로 고려하여 수목의 종, 위치, 개수 등을 선정해야 한국의 온난 습윤한 여름철 열 환경을 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Abdella, K. and McFarlane, N.A. 1996. Parameterization of the surface-layer exchange coefficients for atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*. 80(3): 223-248.
- Akbari, H. 2002. Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environmental Pollution*. 116(SUPPL. 1): S119-S126.
- Anil Kumar. 2010. Medicinal Plants. International Scientific Publishing Academy.
- Allen, R.G. · Luis, S.P. · RAES, D. · Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*. 300(56): 300.
- Armson, D. · Stringer, P. · Ennos, A.R. 2012. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*. 11(3): 245-255.

- Ballinas, M and Barradas, V.L. 2016. The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environment Quality*. 45(1): 157-166.
- Block, A.H. · Livesley, S.J. · Williams, N.S.G. 2012. Responding to the Urban Heat Island: A Review of the Potential of Green Infrastructure. Victorian Centre for climate change Adapatiation research Melbourne.
- Buck, A.L. 1981. New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor. *Journal of Applied Meteorology*. 20(12): 1527-1532.
- Buck, A.L. 1996. Buck Research CR-1A User's Manual, Appendix 1.
- Campillo, C. · Fortes, R. · Henar Prieto, M.D.H. 2012. Solar Radiation Effect on Crop Production. *Solar Radiation*. 1: 494.
- Choudhury, B.J and Monteith, J.L. 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 114(480): 373-398.
- Fatichi, S. 2010. The modeling of hydrological cycle and its interaction with vegetation in the framework of climate change. Ph.D. dissertation, University of Braunschweig.
- Fatichi, S. · Ivanov, V.Y., · Caporali, E. 2012. A mechanistic ecohydrological model to investigate complex interactions in cold and warm water-controlled environments: 1. Theoretical framework and plot-scale analysis. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 4(2): 1-31.
- Gunawardena, K.R. · Wells, M.J. · Kershaw, T. 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*. 584-585: 1040-1055.
- Hargreaves, G.H. 1994. Defining and Using Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 120(6): 1132-1139.
- Hoffmann, P. · Krueger, O. · Schlünzen, K.H. 2012. A statistical model for the urban heat island and its application to a climate change scenario. *International Journal of Climatology*. 32(8): 1238-1248.
- Ivanov, V.Y. · Bras, R.L. · Vivoni, E.R. 2008. Vegetation-hydrology dynamics in complex terrain of semiarid areas: 1. A mechanistic approach to modeling dynamic feedbacks. *Water Resources Research*. 44(3).
- Jang, Y.J. · Heo, H.S. · Kim, B.J. · Kim, S.K. · Hong, G.M. · Lee, W.K. 2012. The Change of The Average Discomfort Index from June to September during The Past 10 Years. *Climate Change Research*. 3(2): 89-100. [Korean Literature]
- Jing, S. · Li, B. · Tan, M. · Liu, H. 2013. Impact of Relative Humidity on Thermal Comfort in a Warm Environment. *Indoor and Built Environment*. 22(4): 598-607.
- Kim, G.W and Coseo, P. 2018. Urban Park Systems to Support Sustainability: The Role of Urban Park Systems in Hot Arid Urban Climates. *Forests*. 9(7): 439.
- Kim, H.D. 1999. On the Properties of Distribution of Discomfort Index in Korea. *Journal of Nakdong River Environmental Research Institute*. 4: 181-192. [Korean Literature]
- Kimm, H.S and Ryu, Y.R. 2015. Seasonal variations in photosynthetic parameters and leaf area index in an urban park. *Urban Forestry and Urban Greening*. 14(4): 1059-1067.
- Konarska, J. · Lindberg, F. · Larsson, A. · Thorsson,

- S. · Holmer, B. 2014. Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees-application for outdoor thermal comfort modelling. *Theoretical and Applied Climatology*. 117(3-4): 363-376.
- Konarska, J. · Uddling, J. · Holmer, B. · Lutz, M. · Lindberg, F. · Plejdel, H. · Thorsson, S. 2016. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *International Journal of Biometeorology*. 60(1): 159-172.
- Korea Meteorological Administration. [Internet]. [cited 2019 May 20]. (in Korean) <http://kma.go.kr>
- Launiainen, J. 1995. Derivation of the relationship between the Obukhov stability parameter and the bulk Richardson number for flux-profile studies. *Boundary-Layer Meteorology*. 76(1-2): 165-179.
- Lin, B.S and Lin, Y.J. 2010. Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park. *HortScience*. 45(1): 83-86.
- Liu, S. · Lu, L. · Mao, D. · Jia, L. 2007. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11(2): 769-783.
- Louis, J.F. 1979. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*. 17(2): 187-202.
- Mascart, P. · Noilhan, J. · Giordani, H. 1995. A modified parameterization of flux-profile relationships in the surface layer using different roughness length values for heat and momentum. *Boundary-Layer Meteorology*. 72(4): 331-344.
- Mirzaei, P.A and Haghighat, F. 2010. Approaches to study Urban Heat Island-Abilities and limitations. *Building and Environment*. 45(10): 2192-2201.
- Morris, L. 1957. The transpiration of glasshouse crops, and its relationship to the incoming solar radiation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(2): 111-122.
- Noilhan, J. and Mahfouf, J.F. 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*. 13(1-4): 145-159.
- O'Loughlin, J. · Witmer, F.D.W. · Linke, A.M. · Laing, A. · Gettelman, A. · Dudhia, J. 2012. Climate variability and conflict risk in East Africa, 1990-2009. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109(45): 18344-18349.
- Oke, T.R. 1987. *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition. Methuen Co., London, New York, 435.
- Park, C.Y. · Lee, D.K. · Krayenhoff, E.S. · Heo, H.K. · Ahn, S. · Asawa, T. · Murakami, A. · Kim, H.G. 2018. A multilayer mean radiant temperature model for pedestrians in a street canyon with trees. *Building and Environment*. 141(May): 298-309.
- Parker, D.E. 2010. Urban heat island effects on estimates of observed climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 1(1): 123-133.
- Radhi, H. · Fikry, F. · Sharples, S. 2013. Impacts of urbanisation on the thermal behaviour of new built up environments: A scoping study of the urban heat island in Bahrain. *Landscape and Urban Planning*. 113: 47-61.
- Rahman, M.A. · Moser, A. · Gold, A. · Rötzer, T. · Pauleit, S. 2018. Vertical air temperature gradients under the shade of two contrasting urban tree species during different types of summer days. *Science of The Total Environment*. 633: 100-111.

- Sellers, P.J. · Randall, D.A. · Collatz, G.J. · Berry, J.A. · Field, C.B. · Dazlich, D.A. · Zhang, C. · Collelo, G.D. · Bounoua L. 1996. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMS. Part I: Model Formulation. *Journal of Climate*. 9(4): 676-705.
- Seoul Metropolitan Government. 2017. Current status of transportation analyzed by transportation card in Seoul, 2016 : Decreasing the number of public transport passengers for two years in a row. (in Korean) Available from: <https://opengov.seoul.go.kr/press/11070105>
- Seoul Metropolitan Government. 2018. Statistics of Street tree in Seoul. (in Korean) Available from: <https://data.seoul.go.kr/dataList/datasetView.do?infId=367&srvType=S&serviceKind=2>
- Shashua-Bar, L. and Hoffman, M.E. 2000. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. *Energy and Buildings*. 31(3): 221-235.
- Shashua-Bar, L. · Pearlmutter, D. · Erell, E. 2011. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*. 31(10): 1498-1506.
- Stull, R.B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. (Roland B. Stull, Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*. 25(2): 99-103.
- Tan, Z. · Lau, KK-L. · Ng, E. 2016. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*. 114: 265-274.
- Thom, E.C. 1957. A new concept of cooling degree days. *Air conditioning, heating and ventilating*, 54(6): 73-80.
- Tomiyama, K. 1988. Evaluation of atmospheric effects for operational tactical decision aid. An Air Force report.
- Van Den Hurk, B.J.J.M. and Holtslag, A.A.M. 1997. On the bulk parameterization of surface fluxes for various conditions and parameter ranges. *Boundary-Layer Meteorology*. 82(1): 119-133.
- Viterbo, P. and Beljaars, A.C.M. 1995. An Improved Land Surface Parameterization Scheme in the ECMWF Model and Its Validation. *Journal of Climate*. 8(11): 2716-2748.
- Wang, Y and Akbari, H. 2016. The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society*. 27(2016): 122-128.

부록

대상지 가로수의 여름철 증산량과 풍속의 관계

변화된 상대습도 계산 과정

수목의 증산 작용으로 인해 변화된 상대습도를 구하기 위하여 먼저 수증기량을 구하기 위해 기존의 온도(T_{air})에서의 포화증기밀도 계산식 (Tomiya, 1988)(식 2-3)으로 포화수증기밀도 ($F(T)$)를 산정하고, 대상지의 부피와 상대습도를 곱하여 수증기량(식 4-5), 마지막으로 증산 작용으로 인한 수증기량(T_v)을 더하여 변화된 수증기량 구하였다(식 6).

$$RH_{af} = Vapor_{af} / Vapor_{sat2} \times 100 \quad (1)$$

$$A = \frac{273.15}{273.15 + T} \quad (2)$$

$$F(T) = e^{(18.9766 - 14.9595A - 2.43882A^2)} \times A \quad (3)$$

$$Vapor_{sat}(T) = F \times V_{area} / 1000 \quad (4)$$

$$Vapor_{bf} = Vapor_{sat}(T) \times RH / 100 \quad (5)$$

$$Vapor_{af} = Vapor_{bf} + T_v \quad (6)$$

여기서 $Vapor_{sat}(T)$ 는 포화수증기량, $Vapor_{bf}$ 는 증산 이전의 증기량이고 $Vapor_{af}$ 는 증산으로 인해 변화된 증기량이다. 변화된 온도($T_{air} + \Delta T$)에서의 포화수증기량 또한 식 (2)-(4)으로 계산한다($Vapor_{sat2}$). 그리고 마지막으로 변화된 상대습도를 산정한다(식 1).

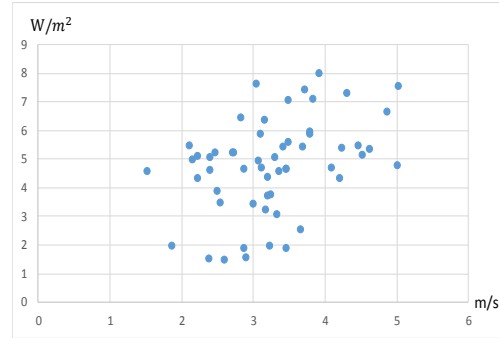


Figure 1. The relationship between wind speed and latent heat. X axis is the wind speed at AWS height and Y axis is the latent heat of transpiration

Figure 1을 보면 풍속이 증가할수록 전체 면적에서의 단위면적당 증산 잠열량이 증가하는 것을 볼 수 있다.