

Research Paper

미시적 열섬현상 저감을 위한 도시 가로수 식재 시나리오별 분석 - 서울시를 대상으로 -

권유진* · 이동근** · 안새결***

서울대학교 협동조경학과*, 서울대학교 조경시스템공학부**, 서울대학교 조경시스템공학부***

Urban Street Planting Scenarios Simulation for Micro-scale Urban Heat Island Effect Mitigation in Seoul

You Jin Kwon* · Dong Kun Lee** · Saekyul Ahn***

Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University*
Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University**
Graduate School, Seoul National University***

요약: 지구온난화는 해수면 상승이나 전 세계의 변덕스러운 기후와 같은 심각한 부차적인 문제를 야기한다. 2015년 여름에 심각한 폭염이 있는 이래로, 도시열섬에 대한 큰 관심이 모아졌다. 폭염 자체에 대한 연구뿐만 아니라, 많은 연구가 온난화된 기후와 미시 기후에 적응하는 방법에 중점을 둔다. 기존 연구들의 상당부분은 도시열섬 효과를 완화하는 것인데, 이는 다양한 활동을 하고 있는 인구가 많은 도시 지역에 거대한 불침투성 표면이 존재하고 있기 때문이다. 또한 이 열 환경이 열 취약성에 의한 사망을 초래할 가능성이 높다는 것은 심각한 문제이다. 여름철 그린인프라의 냉각효과에 대한 논문이 많이 있어왔지만, 본 연구는 도시 협곡과 인접한 그린인프라 유형을 고려하여 가로수의 냉각 효과를 측정하는 데에 집중했다. 이 정량적 접근은 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 서울의 상업지역 블록에서 진행되었다. 연구결과로 밀도가 높은 2열 식재가 단열식재보다 온도 변화에 더 민감하다는 것을 발견했다. 2열 식재 시나리오 중 가로수와 지표면 사이의 공간이 좁은 관목은 주간에 열을 저장하여 야간에 저장열 방출을 막아 더 높은 온도를 유지하는 것으로 밝혀졌다. 식생 공간의 냉각 효과를 정량화하면 미래의 비용 및 편익 평가 연구에 기여할 것으로 기대된다.

주요어: 도시협곡, 열수지, ENVI-met, 폭염, 냉각효과

Abstract: Global warming becomes a serious issue that poses subsidiary issues like a sea level rise or a capricious climate over the world. Because of severe heat-wave of the summer in Korea in 2016,

First Author: You Jin Kwon, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: eugene.kwon@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-4332-4956

Corresponding Author: Dong Kun Lee, Dept of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea, Tel: +82-2-880-4875, E-mail: dkleee7@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7678-2203

Co-Author: Saekyul Ahn, Master's-degree student, Dept. of Landscape Architecture & Rural System Engr., Seoul National University, Seoul, 08826, Korea, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: ahnsk0208@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2757-8139

Received: 22 September, 2018. Revised: 1 December, 2018. Accepted: 22 January, 2019.

a big attention has been focused on urban heat island since then. Not just about heat-wave itself, many researches have been concentrated on how to adapt in this trendy warming climate and weather in a small scope. A big part of existing studies is mitigating "Urban Heat Island effect" and that is because of huge impervious surface in urban area where highly populated areas do diverse activities. It is a serious problem that this thermal context has a high possibility causing mortality by heat vulnerability. However, there have been many articles of a green infrastructures' cooling impact in summer. This research pays attention to measure cooling effect of a street planting considering urban canyon and type of green infrastructures in neighborhood scale. This quantitative approach was proceeded by ENVI-met simulation with a spatial scope of a commercial block in Seoul, Korea. We found the dense double-row planting is more sensitive to change in temperature than that of the single-row. Among the double-row planting scenarios, shrubs which have narrow space between the plant and the land surface were found to store heat inside during the daytime and prevent emitting heat so as to have a higher temperature at night. The quantifying an amount of vegetated spaces' cooling effect research is expected to contribute to a study of the cost and benefit for the planting scenarios' assessment in the future.

Keywords : Urban canyon, Heat balance, ENVI-met, Heat wave, Cooling impact

I. 서론

지구 온난화로 인한 기상이변은 여름 일수를 증가시켜 여름의 재난 중 하나인 폭염의 일수를 증가시킨다. 한편 도시의 열섬현상(Urban Heat Island Effect; UHIE: Rizwan et al, 2008)은 지구온난화에 영향을 미치는데(Alcoforado & Andrade 2008) 증가된 폭염 일수로 인한 도시내의 냉방 시설 사용의 증대는 인공열을 발생시키고 알베도 증가에 따른 도시내의 장파복사열을 높힘으로써 도시 열환경에 직접적인 영향을 주고 있다(Lee et al. 2008). 특히 인공표면이 많은 도시협곡구조는 보행자들의 보행공간에서의 열 쾌적성(thermal comfort) 혹은 온열질환(heat stress)에 영향을 준다(Erell et al, 2014). 도시협곡에 입사되는 태양복사열의 차단 혹은 갇힘(Trapping) 작용으로 인해 변화된 열수지는 UHIE을 유발하는 원인이다.

도시 열섬현상에 대한 연구는 도시 협곡구조를 형성하는 고층 건물군 속에서의 열섬현상에 대한 이해(Stone Jr. & Roadgers 2001; Coutts et al, 2015)와 함께 도시 온도를 저감시키는 수단에 대한 연구로 발전시켜왔다(Santamouris 2013; O'Malley et

al, 2015; Aflaki 2017). 그 일환으로 녹지확충(옥상 녹화, 벽면녹화, 가로수 등)이 열수지의 영향을 받는 도시내 온도완화의 수단이다(Do et al, 2007). 초지에 비해 효율적인 열섬 저감 수단(Cho et al, 2009)으로 주간에 협곡안으로 투입되는 태양복사열을 차단하고 그림자를 형성하는 가로수 식재를 들 수 있다(Heisler 1986; Berry et al, 2013; Loveday et al, 2017; Keshtegar et al, 2018). 가로수는 협소한 도시 공간에 효과적으로 녹지를 확보하는 수단이다(Sung & Min 2003).

보행자에게는 가로수 주변 시설이 수관 아래에서의 바람길을 막아 열의 수직적 순환을 방해하여(Gromke et al, 2008) 열을 공간에 갇히게 할 수 있다. 반면 도시 가로수는 건축물과 도로 근접 식재의 특성상 낮은 천공률로 인해 인공열을 막아주는 역할을 한다(Shashua-Bar et al, 2010).

그러나 온도 저감에 대한 도시 가로수 식재의 영향만을 고려하기에는 도시 밀집공간의 비용과 토지이용 면에서 한계가 있다. 따라서 합리적인 가로수 배치가 요구되고 있으나 같은 조건의 공간 안에서 최적의 배식 수 혹은 배치 방법에 대한 규정과 그 근거에 대한 정량적 평가가 필요하다.

독일, 이탈리아, 네덜란드와 같은 서유럽 국가들의 도시 가로수 배치에 대한 실험적 논문(Picot 2004; Mayer et al. 2008; Taleghani et al. 2015)과 국내에서의 가로수 자체의 기온저감을 시뮬레이션으로 알아본 연구들(Yang et al. 2013)은 기존에 많이 존재해 왔으나 인구 과밀지역인 서울에서의 열섬현상 완화를 위한 합리적 가로수 배치에 대한 연구가 미미하다. 그러한 맥락에서 여름 평균 낮기온이 가장 높은 중심업무지구(Central Business District; CBD)에서의 식재 패턴에 따른 영향 특히, 온도 저감 효과를 알아볼 필요가 있다. 대부분이 불투수성 표면으로 이뤄진 도시의 열환경(Kim J. et al. 2015)에 식재 패턴 계획이 중요하다.

경험적 연구를 통해 수목의 배치에 따른 기온 변화에 대한 연구(Milosevic et al. 2017)가 객관성 면에서 선호되나 적합한 연구대상지 선정의 어려움과 측정의 과정이 쉽지 않다. 따라서 UHIE가 강하게 나타나는 도시의 공간적 특성을 반영한 시뮬레이션을 구동하여 열적 변화를 알아볼 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 서울시내에서 여름철 평균 낮기온이 가장 높은 대표적 CBD중 하나인 강남역 일대의 도시 협곡 구조를 모델로 택하였다. 서울시의 도시계획이 허용하는 범위 내에서 가로수의 배치에 대한 시나리오를 구성하여 이에 따른 시간 변화적 온도 저감 효과를 계량적으로 구명해보고자 한다.

열섬현상에 대한 시뮬레이션 연구를 위한 프로그램에는 ENVI-met, Rayman, Solweig 등이 있다(Janicke et al. 2015; Lee & Mayer 2016; Chen et al. 2016). 그러나 이 소프트웨어 중 ENVI-met을 무료버전으로 구하기 용이하였기에 활용하였다.

한편, ENVI-met은 연구대상지의 상대습도, 풍속, 풍향, 태양고도각 등의 실제 3차원적 미기상현황과 토지피복 종류 및 건축물 높이, 도로폭 등의 공간특성을 반영한 미기후적 접근에서 3차원적 기온변화를 알아보기에 적합하고 국제적으로 범용적인 의사화의 도구이다(Appendix). ENVI-met을 사용한 연구는 도시속 보행자의 열쾌적성에 대한 연구(Morakinyo & Lam 2016; Milosevic et al. 2017; Tan et al. 2017), 수목의 기온 저감에 대한 연구

(Tan et al. 2016; Lee et al. 2016; Maleki & Mahdavi 2016; Wang and Akbari 2016; Roth & Lim 2017; Wu and Chen 2017), 옥상녹화의 기온저감에 대한 연구(Morakinyo et al. 2017), 토지피복과 기온저감에 대한 연구(Gago et al. 2013; Kyriakodis & Santamouris 2018)가 있다.

본 연구에서는 가로수 식재에 의한 2열 식재 혹은 단열 식재가 이루어질 경우, 시간별 온도 변화에 대해 ENVI-met 3D 시뮬레이션(Appendix 검증 참고)을 활용해서 식재시나리오가 열섬저감에 얼마나 기여하는지를 알아보았다.

향후에 이를 토대로 식재의 패턴에 따른 편익비용을 산정하여 식재패턴으로 인한 열섬 저감의 경제학적 영향을 알 수 있다.

II. 식재패턴 별 시나리오 구성

본 연구에서는 대표적인 서울시 가로수 식재 방법 중 단열과 2열 식재의 시간에 따른 온도 감소효과를 분석하기 위해 ENVI-met을 이용하여 온도저감 효과량을 산정하였다. 그 후, 열섬현상 저감에 대한 기여도를 분석하였으며, 부가적으로 습도, 풍속, 풍향 등을 산출하였다. 이러한 산출 값들을 바탕으로 도시협곡구조 내에서의 식재 패턴에 의한 열섬 현상 저감 효과를 계량적으로 산정하였다.

1. 연구 대상지

연구 대상지인 강남역은 도시협곡구조를 나타내고(Figure 1), CBD로써 상업지역이며 토지의 60%가

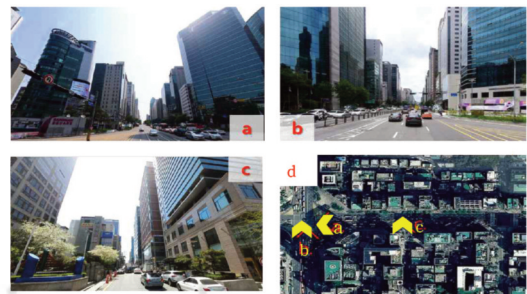


Figure 1. Study area street views (a, b, c) & Key map plan (d) (photos : Naver.com map street view)

인공지반으로 구성이 되어 있다. 대부분이 50m 이상의 고층 상업용 건축물로 형성된 10차선의 광로(테헤란로)와 8차선의 대로(강남대로)가 교차하지만 건축물 블록내 소로(10~15m)가 있는 고층건축물 밀집지역이다. 이 지역은 다수의 유동인구가 발생하고 여름 폭염으로 인해 보행자의 쾌적성이 불량한 곳이다.

2. 대상지 여건(기후조건과 공간 특성)

올해를 제외한 가장 높은 폭염을 기록했던 2016년 8월 5일의 바람, 상대습도 등의 미기후 데이터¹⁾를 사용하였고 대상지의 공간 특성으로 도로포장, 건축물 표면종류, 중형비, 지리적 위치를 고려하였다. ENVI-met 시뮬레이션을 구동하여 그 저감 효과를 분석하였다.

SKTX²⁾에서 수집한 온도데이터로 1년 4계절 동안의 온도분포(Figure 2)를 살펴본 결과, 고온이 집중된 곳이 Figure 2(b)에 CBD와 일치한다. 이는 고온이 몰려있어 주변보다 높은 온도를 보이며 지역적 열섬 현상이 나타나는 지역이 CBD를 중심으로 분포하고 있다.

3. 도메인 설정 및 시뮬레이션 환경

시뮬레이션을 구동할 모델의 도메인은 강남역일대의 강남대로와 테헤란로가 교차하는 블록으로 300 * 300 * 300 m의 크기를 가진다. 격자셀 하나당 크기는 5 * 5 m이고, 건축물들은 18층 높이(63m)로 고정을 하며 8차선인 테헤란로의 너비는 42m이고, 보행자 통로가 있는 이면도로는 10~15m로 설정을 했다. 토지 피복은 자동차 도로는 아스팔트이고 보행로는 밝은 콘크리트로 설정하였다. 따라서 건축물과 바닥재로 인한 알베도는 일정하다고 가정한다. 본 모델은

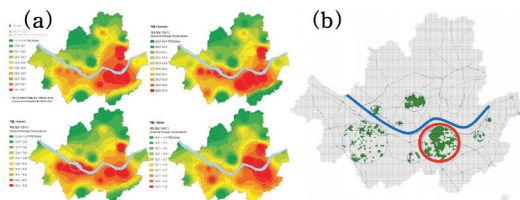


Figure 2. (a) Seasonal mean temperature, (b) location of CBD in Seoul (Seo 2014; Seoul Institute 2016)

나무의 크기와 배치에 따른 기온 변화를 보기 위한 것으로 도시 협곡구조의 기온에 영향을 미치는 천공률이나 알베도(Albedo)의 변화에 의한 영향을 일제히 배제한다. 단, 건축물에 의한 그림자는 존재하여 시간에 따른 그림자 변화는 있다. 모델의 건축물과 도로의 아웃라인을 구성하기 위해 인공위성 사진(네이버 위성사진)을 사용해 CAD에서 평면도를 작성하였다.

Table 1. Input parameters for a scenarios' at ENVI-met simulation

File	Parameter	Value / Type
Configuration (A)	Running start time	August. 4th. 23:00
	Total running time	24 hours
	Wind speed/ direction	1m/s / Southeast
	Air temperature	32°C/fixed
	Relative humidity (2m from the ground level)	75%
Area (G.L. 1.5m) (B)	Building wall surface	Concrete
	Land cover	Asphalt (Road), Loam (Soil), Bright-colored paving (Pedestrian path)
	Asphalt (%)	40
	Concrete (%)	10
	Building height (m)	63
	Road width (m)	42
	Pedestrian path width (m)	10~15
	Tree height (m)	10
Shrub height (m)	1	

Sources: (A) Korea Meteorological Administration, (B) Ministry of Environment, SGIS 2015 and <https://opengov.seoul.go.kr/>

- 1) 미기후데이터: 서울시 기상청 자료 활용.
- 2) SK TechX: 국토교통부 열섬과제 2016년 온도자료 활용.

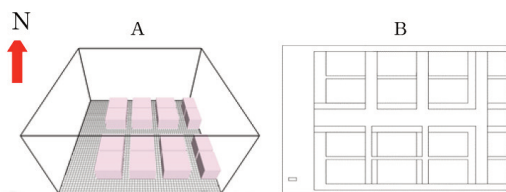


Figure 3. A: a domain of 3D view and B: a schematic plan for ENVI-met simulation

시나리오에 들어갈 교목과 관목은 서울의 가로수 (Sung & Min 2003)를 참고한 수종을 중심으로 보편성을 갖도록 하였다. ENVI-met에 내장된 수동식 (Manual) 편집도구인 Albero를 통해 프로그램에서 지원하는 기존의 수목 3D 모형을 국내 도심 가로수 높이 (평균수고 10m, Sung 2003)와 수관폭(10m)과 같게 수정하였다(Table 1). 시뮬레이팅 환경은 서울시 가로수 관련법규에 의거해 가로수를 보.차도 경계선으로부터 1m 이상, 식재 간격은 수종에 따라 10m로 조정했다(Article 6 and 7, Seoul municipal ordinance of street planting and management 2015).

4. 시나리오 구성

도시 가로수 식재의 패턴은 도로를 따라 일렬 혹은 2열 배치를 한다. 서울시 식재지침을 참고하여 식재 공간의 효율적 확보를 위한 가로수 패턴을 고려한 시나리오는 연구 대상지의 단열식재를 기본으로 시작하여 교목과 관목과 함께 7가지의 변형된 패턴들을 적용하였다(Figure 4). 수목들은 도메인의 중앙에 동서 방향으로 놓여있는 도로를 따라 남북으로 배치되었다. 도메인에 구성되어 있는 북쪽 6개동, 남쪽 6개동의 건축물 사이의 이면도로와 건축물간의 통로에

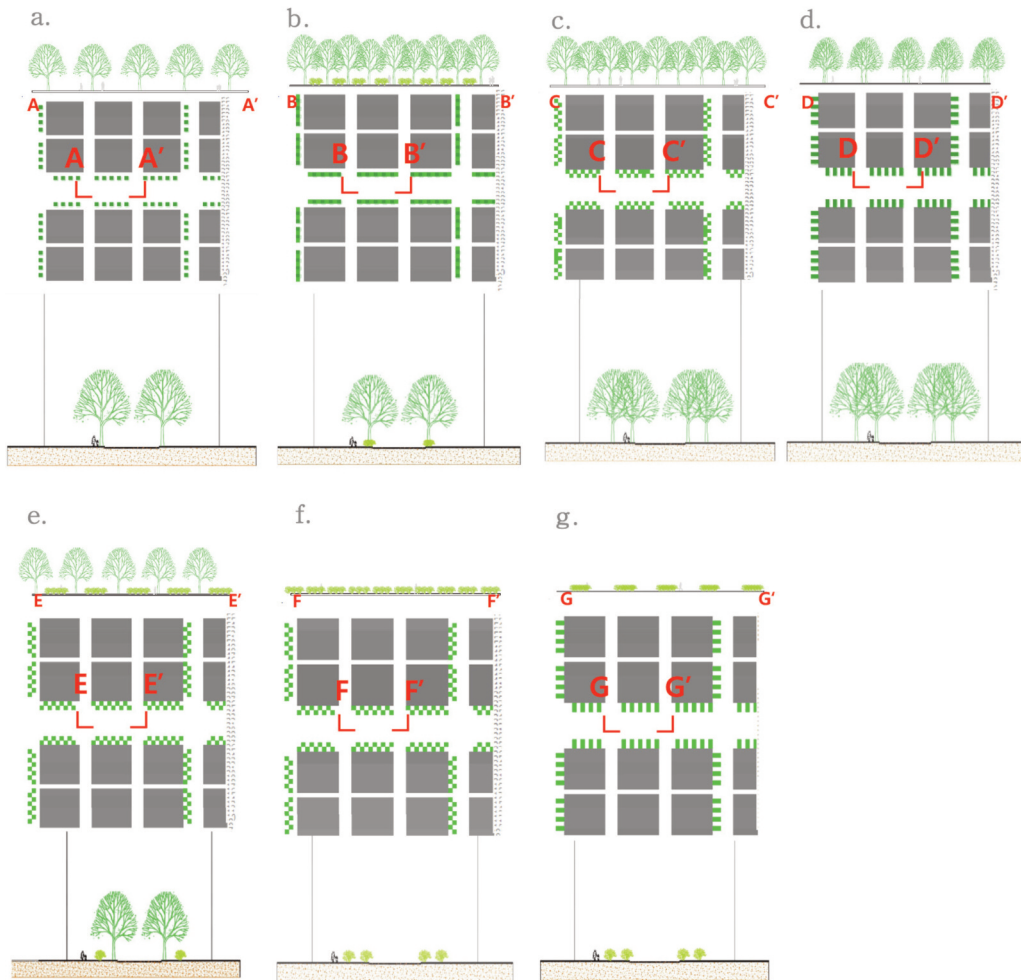


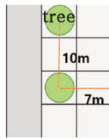
Figure 4. Seven scenarios

a. VS (Single-row tree), b. VM (Straight single-row shrub), c. TT (Twisted double-row tree), d. SDT (Straight double-row tree), e. TM (Twisted double-row tree and shrub), f. TS (Twisted double-row shrub), g. VSD (Straight double-row shrub), profiles and sections of AA'~GG'

는 배식이 없고 건축물 단지 양단에 있는 대로와 광로에는 배식이 되어 있다.

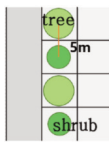
1)시나리오 VS single-row tree

연구 대상지의 기본패턴인 교목의 단열 식재 패턴이다. 식재간 거리는 10m 이고, 건축물 벽과 식재 사이의 거리는 7m, 도로와 보행로의 경계선으로부터 수목의 중심까지의 거리는 1m 미만이다.



2)시나리오 VM single-row tree+shrub

첫 번째 VS와 마찬가지로 단열 식재이지만 교목과 관목을 번갈아가며 식재한 패턴이다. 교목간 10m이고 교목과 관목의 중심간 거리를 5m로 하여 배치하였다. 이는 교목의 그림자 효과로 인한 쿨링효과 이외에도 그림자의 효과를 크게 창출하지 못하는 수고가 낮은 관목을 통해서도 온도 저감의 효과를 볼 수 있는지를 알아보기 위한 시나리오이다.



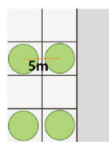
3)시나리오 TT twisted-double tree

교목의 중심이 서로 일직선상에서 겹치지 않게 7m(5 * m)씩 오프셋을 뒤 교차해가며 2열로 식재한 경우이다. TT는 일직선 2열 식재에 비해 수목 아래의 공간이 적은 경우, 온도의 변화가 어떻게 나타날 것인지를 알아보기 위한 시나리오이다.



4)시나리오 SDT straight double-row tree

교목을 수목의 중심을 기준으로 일직선상에 배치해 중심간 거리가 5m 로 2열 식재한 패턴이다. SDT는 단열 식재에 비해 그림자의 크기가 큰 경우, 온도의 저감 효과가 얼마나 클 것인지를 알아보기 위한 시나리오이다.



5)시나리오 TM twisted single-row tree+ shrub

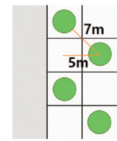
교목과 관목을 교차해서 식재한 패턴



으로 수목 위 공간에 거칠기를 줘서 협곡 안의 공간에 바람의 변화를 줬을 때 대기 온도의 변화를 알아보고자 설정한 시나리오이다.

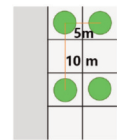
6)시나리오 TS twisted double-row shrub

TM과는 달리 관목을 엇갈리게 교차해서 2열 식재를 한 경우로써 수목이 그림자의 쿨링 효과를 제외한 온도 저감을 가져올 것인지를 여부를 알아보고자 구성된 시나리오이다.



7)시나리오 VSD straight double-row shrub

관목들만 나란히 2열 식재를 한 시나리오이다. 엇갈리게 식재한 TS와 비교하여 온도변화 차이를 알아보고자 설정한 시나리오이다.



5. ENVI-met 구동

ENVI-met 모형의 구동에서 2가지 입력자료(Configuration File, Area Input File)가 필요하다 (Figure 5). Configuration File에는 지역, 시간, 온도 습도, 풍향, 풍속 등의 환경정보를, Area input file에는 시뮬레이션 대상 지역의 건축물 위치와 높이, 재질, 식생의 위치와 수종, 토양 및 토지 피복정보 등의 공간정보를 입력하는 파일이다. 입력변수들을 입력하기 전에 시뮬레이션 대상지역은 일정 규격의 격자로 분할된다. 단, 피복에 대한 래스터 자료는 격자안의 면적이 50% 이상일 경우의 해당요소로 처리한다. 토양종류, 건축물 재질, 수고, 수관폭 등의 입력 자료에 대한 메타정보들은 별도의 데이터베이스

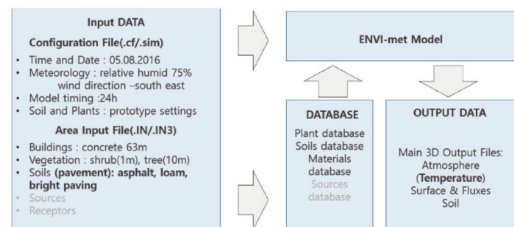


Figure 5. ENVI-met Simulation flow chart for seven scenarios (a process from input data using DATABASE to output data)

스 파일로 저장된다.

시뮬레이션의 출력자료는 구동을 통해 산정된 온도, 습도, 풍향, 풍속, PET (Physiological Equivalent Temperature; 열쾌적성지표: Honjo 2009)등의 정보를 담고 있는 Main data files(.EDI/.EDT)이 있다. 본 연구의 출력자료는 ENVI-met 내에 내장된 Xtract와 LEONARDO(Graphic interface program)를 이용하여 수치자료를 데이터테이블로 도출 및 온도분포도로 시각화하여 자료를 분석한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 고찰

1. 시간에 따른 온도 변화

시나리오별 시간에 따른 온도의 추이 변화를 살펴본 결과, 온도 변화에 약간의 정도 차이가 있으나 단열식재를 제외한 모든 시나리오가 비슷한 양상으로 그 추이가 나타난다. 15시에 최고 기온이 나타나고 23시에 최저 기온이 나타난다(Figure 7).

주간(11시~15시)에는 2열 식재를 한 시나리오들이 단열식재 시나리오보다 기온이 가파르게 상승한다. 단열식재 시나리오보다 비교적 촘촘하게 배치된 나머지 6가지 시나리오에서 장파복사열 반사를 많이 하는 수목 우듬지(treetop)의 우세 존재와 수목에 의한

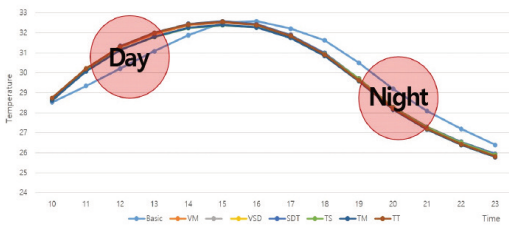


Figure 6. Hourly temperature shift of 7 scenarios presenting a different gap between day and night

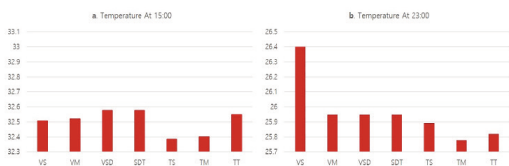


Figure 7. Temperature shift in 6 scenarios (VM, VSD, SDT, TS, TM, TT), a. Temperature shift in day time (15h), b. Temperature shift in night time (23h)

바람의 흐름과 현열(sensible heat; 사람이 느끼는 열: Grimmond 1999)의 대류를 막는 저항면적이 더 크기 때문이다(Murakami & Hoyano 2008). 반면 급격한 야간의 냉각효과는 수목의 활발한 증발산작용 때문이다(Rahman et al, 2017).

2. 시나리오별 온도변화

앞서 시나리오별 시간에 따른 변화를 살펴볼 수 있었다. 관측일인 8월 5일에 가장 높은 기온을 나타낸 때인 15시와 가장 낮은 기온을 나타낸 23시의 온도는 Table 2와 같다. 주간(15시)에 시나리오 VSD와 SDT에서 가장 높은 수치(32.58°C)로 같게 나타났다. 그 다음으로 TT, VM, TM, TS 순으로 관목으로만 구성이 된 시나리오 TS가 가장 낮은 기온으로 나타났다. 야간에도 시나리오 VSD와 SDT가 최고 기온(25.95°C)으로 동일하게 나타났다. 그러나 그 이후의 기온은 주간과는 다르게 시나리오 VM, TS, TT, TM순으로 TM의 기온이 25.78°C로 가장 낮게 나타났다.

각각의 시나리오들을 비교해 보면 시나리오별 기온 변화의 크기가 야간보다는 주간이 더 높게 나타났다. 주간과 야간의 최저 기온차(6.50°C)를 보이는 것은 TS였고, 최고 기온차를 보인 것은 TT(6.73°C)였다. 이는 시나리오 TS가 TT에 비해 주야간의 온도 저감 효과가 낮게 나타나는 것을 의미한다(Table 2).

본 연구에서도 건축물과 수목의 배치와 대기 대류 현상에 따른 쿨링 영향을 받았음(Hong & Lin 2015)을 보여준다. 도시 협곡구조에서는 주야간에 따라 바람의 흐름 영향을 달리 받는다(Nakamura & Oke 1988).

대기의 흐름이 빠른 주간(Op. cit.)에 TS 시나리오 오는 바람의 흐름에 대해 방해물인 교목만 식재되어 있는 TT에 비해 열의 순환 속도가 빠르다. 따라서 교

Table 2. Temperature shift & standard deviation on each scenario at day & night (unit: °C)

Time	VS	VM	VSD	SDT	TS	TM	TT	max.-min.	Std. Dev.
15	32.5	32.5	32.5	32.5	32.3	32.4	32.5	0.19	0.09
23	26.4	25.9	25.9	25.9	25.8	25.7	25.8	0.17	0.07

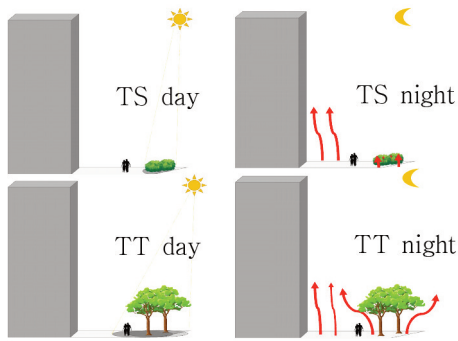


Figure 8. Heat flux diagram of TS & TT : At night TS and TT indicate that the storage heat is released from the surface of the earth and there is a difference in the numerical value of the emission heat under shrubs and trees.

목의 TT가 온도 저감 속도가 더 큰 결과(Table 2, Figure 7)를 나타낸다.

이에 교목으로만 식재되어 수관아래 공간이 있어 바람의 흐름이 있는 시나리오보다 관목으로만 식재되어 바람의 흐름이 막힌 TS에서 주간에 저장된 열이 지표면으로 방출된다(Liang et al. 1999). 따라서 야간에 TS의 온도가 더 높다(Table 2).

두 시나리오의 온도 차이가 아주 극소해서 통계적으로 보면 Pearson 검정(모수 검정)을 실시한 결과 유의성이 0.00 으로 TS와 TT간의 온도 차이는 유의한 것으로 나타났다(Table 3).

Table 3. TT & TS significance test

Correlations		TS	TT
TS	Pearson Correlation	1	.997**
	Sig. (2-tailed)		0.000
	N	1289	1289
TT	Pearson Correlation	.997**	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	
	N	1289	1289

V. 결론

본 연구는 도시 협곡구조에서 수목의 크기와 수목 식재배치 변화에 따른 시나리오를 설정하고 각 시나리오에 의한 시간별 기온변화를 분석하였다. 시뮬레이션을 통한 건축구조의 변화와 수목의 위치에 따른

기온 저감을 살펴본 기존 연구가 있어왔으나 수목의 크기와 배치에 따른 시나리오를 설정하여 시간별 변화를 서울시 배경으로 미시적 분석을 하였다는 데에 차별성이 있다.

그 결과 본 연구에서는 식재의 패턴에 따른 단열식재의 시나리오들이 시간별 온도 변화가 저장열의 해질녘에 이를수록 그 변화 값의 감소율이 커지다가 야간에 가서는 완만하게 감소하는 추세를 지닌다. 그러나 단열식재의 경우 15~16시에 온도가 높은 상태를 이루지만 16시 이후 서서히 낮아지며 타 시나리오보다 상대적으로 높은 열을 갖는 경향이였다. 다만 낮과 밤의 온도 상승 및 하락의 속도가 단열 식재와 2열 식재 시나리오에서 차이를 보였고 단열 식재의 경우, 기온의 변화 속도가 완만했다. 이는 2열 식재가 조성되어 있는 협곡 공간이 단열 식재가 조성되어 있는 공간보다 낮에 장파복사열 반사를 증가시키는 우듬지와 바람의 흐름과 현열의 대류를 막는 수목의 저장면적이 크기 때문이었다.

시나리오별 비교에서 낮과 밤의 온도 변화 차이는 작은 반면, 교목 2열 식재(TT) 시나리오와 관목 2열 식재(TS) 시나리오가 큰 차이를 보였다. 대부분의 시나리오에서 주야간의 온도 추세에서 변화율이 점진적으로 하락한 것과는 대조적으로 TS의 밤의 온도 변화량이 다른 시나리오의 변화량에 비해 증가한 것으로 나타났다. 이는 수고가 높은 교목에 비해 낮은 관목이 낮동안의 열을 저장한 결과로 보인다.

따라서 본 연구를 통해 치밀한 2열 식재(VS외 6가지 시나리오)가 성근 단열 식재(VS)보다 온도의 변화차가 커졌다. 이러한 결과는 더 많은 식재가 열적 감소와 16시 이후 20시에 더 큰 차이로 변화함을 나타냈다. 2열 식재 중에서도 식재와 토지 표면 사이의 공간이 좁은 관목이 주간 열을 저장하여 밤에는 상대적으로 더 많은 저장열을 갖고 있으므로 토지표면의 온도가 쉽게 식지 않는다는 것을 발견하였다.

본 연구의 결과를 활용할 경우, 도시 협곡구조에서 식재 패턴에 따른 도시내 열섬 저감 효과를 정량적으로 산정함으로써 경제적으로 효율적인 패턴을 도시 열환경 계획 및 설계에 반영할 수 있는 준거가 될 수 있다.

사 사

본 연구는 국토교통부 도시건축연구개발사업의 연구비지원(19AUDP-B102406-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Aflaki A, Mirneshad M, Ghaffarianhoseini A, Ghaffaranhoseini A, Omrany H, Wang Z-H, Akbari H. 2017. Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*. 62: 131-145
- Alcoforado MJ, Andrade H. 2008. Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature. Springer. Chapter 14, Global Warming and the Urban Heat Island; p. 249-262.
- Berry R, Livesley SJ, Aye L. 2013. Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. *Building and Environment*. 69: 91-100.
- Chen L, Yu B, Yang F, Mayere H. 2016. Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heat waves: A GIS-based approach, *Energy and Buildings*. 130: 829-842.
- Cho S-M, Yoon Y-H, Ryu E-R. 2009. The influence of land cover and zoning on the urban heat island in Cheongju. *Journal of the Environmental Sciences*. 18(2): 169-176. [Korean Literature]
- Coutts AM, White EC, Tapper NJ, Beringer J, Livesley SJ. 2015. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon Environments. *Theory Applied Climatology*. 124: 55-68.
- Do H-J, Lee JM, Ra J-H. 2007. A study on the distribution characteristic of urban surface temperature and urban heat island effects. *Journal of the Environmental Sciences*. 16(5): 611-622. [Korean Literature]
- Erell E, Pearlmutter D, Bonch D, Kutiel PB. 2014. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*. 10: 367-386.
- Gago EJ, Roldan J, Pacheco-Torres R, Ordóñez J. 2013. The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25: 749-758.
- Grimmond, CSB, Oke, TR, 1991. An Evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resources Research-AGU Journal*, 27(7): 1739-1755.
- Heisler GM. 1986. Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings. *Urban Ecology*. 9(3-4): 337-359.
- Hong B, Lin B. 2015. Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement. *Renewable Energy*. 73: 18-27.
- Jänicke B, Meier F, Hoelscher M-T, Scherer. 2015. Evaluating the effects of facade greening on human bioclimate in a complex urban environment, *Advances in Meteorology*. 747259: 1-15.
- Keshtegar B, Mert C, Kisi O. 2018. Comparison of four heuristic regression techniques in solar radiation modeling: Kriging method vs RSM, MARS and M5 model tree. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81(1): 330-341.

- Kim J, Lee D, Sung S, Park J. 2015. Study of vulnerable district characteristics on urban heat island according to land use using normalized index: Focused on Daegu Metropolitan City residential district. *Journal of Korea Planning Association*. 50(5): 59-72. [Korean Literature]
- Kyriakodis G-E, Santamouris M. 2018. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate*. 24: 326-339.
- Lee H, Mayer H. 2016. Validation of the mean radiant temperature simulated by the RayMan software in urban environments, *International Journal of Biometeorology*. 60(11): 1775-1785.
- Lee H, Mayer H, Chen L. 2016. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*. 148: 37-50.
- Lee H-J, Lee K-O, Lee S-H, Lee H-W, 2008. Numerical Study on the Air Cooling Effect due to Increased Albedo in Urban Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 24(4): 383-392. [Korean Literature]
- Liang X, Wood EF, Lettenmaier DP. 1999. Modeling ground heat flux in land surface parameterization schemes. *Journal of geophysical research*. 104: 9581-9600.
- Loveday J, Loveday GK, Byrne J, Ong BL, Newman P. 2017. A technique for quantifying the reduction of solar radiation due to cloud and tree cover. *Procedia Engineering*. 180: 403-412.
- Maleki A, Mahdavi A. 2016. Evaluation of urban heat islands mitigation strategies using 3d imentional urban micro-climate model ENVI-met. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*. 17(3): 357-371.
- Mayer H, Kuppe S, Holst J, Imbery F, Matzarakis A. 2008. Human thermal comfort below the canopy street trees on a typical Central European summer day. In: Editor HM, Editor AM, editors. *Proceedings of the 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology; 2008 Oct; Freiburg (GER); Albert-Ludwigs-University of Freiburg*.
- Milosevic DD, Bajsanakib IV, Savic SM. 2017. Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways. *Urban Forestry & Urban Greening*. 23: 113-124.
- Morakinyo TE, Dahanayake KWD, Kalani C, Ng E, Chow CL. 2017. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Building*. 145: 226-237.
- Morakinyo TE, Kong L, Lau K, K-L, Yuan C, Ng E. 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.
- Morakinyo TE, Lam YF. 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.
- Murakami A, Hoyano A. 2008. Study on urban heat island phenomenon in a local small city of Japan using airborne thermal image. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Sep. III*: 1354-1357.
- Nakamura Y, Oke TR. 1988. Wind, temperature and stability conditions in an East-West

- oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*. 22(12): 2691- 2700.
- O'Malley C, Piroozfar P, Farr ERP, Pomponi F. 2015. Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. *Sustainable Cities and Society*. 19: 222-235.
- Picot X. 2004. Thermal comfort in urban spaces: impact of vegetation growth Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy. *Energy and Buildings*. 36: 329-334.
- Rahman MA, Moser A, Rotzer T, Pauleit S. 2017. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment*. 114: 118-128.
- Rizwan AM, Dennis LYC, Liu C. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat island. *Journal of Environmental Sciences*. 20(1): 120-128.
- Roth M, Lim VH. 2017. Evaluation of canopy-layer air and mean radiant temperature simulations by a microclimate model over a tropical residential neighbourhood. *Building and Environment*. 112: 177-189.
- Santamouris M. 2013. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island-A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26: 224-240.
- Shashua-Bar L, Potchter O, Bitan A, Boltansky D, Yaakov Y. 2010. Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*. 30: 44-57.
- Stone Jr, B, Rodgers, MO. 2001. Urban form and thermal efficiency: How the design of cities influences the urban heat island effect. *Journal of the American Planning Association*. 67(2): 186-198.
- Sung H-C. 2003. A Study on the Present Status of Urban Roadside Trees by Major Road Types: Focusing on 7 cities in Kyonggi Province, *Journal of Korea Planning Association*. 38(3): 245-257. [Korean Literature]
- Sung H-C, Min S-H. 2003. An Empirical Study on the Function and Effect of Urban Openspace : Focusing on Urban Roadside Trees, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*. 31(2): 48-57. [Korean Literature]
- Taleghani M, Kleerekoper L, Tenpierik M, Dobbelsteen A van den. 2015. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*. 83: 65-78.
- Tan Z, Lau KK-L, Ng E. 2017. Planning strategies for roadside tree planting and outdoor comfort enhancement in subtropical high-density urban areas. *Building and Environment*. 120: 93-109.
- 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.
- Wang Y, Akbari H. 2016. The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society*. 27: 122-128.
- Wu Z, Chen L. 2017. Optimizing the spatial arrangement of trees in residential neighborhoods for better cooling effects: Integrating modeling with in-situ measurements, *Landscape and Urban Planning*. 167: 463-472.
- Yang I, Hwang H-C, Lee Y, Lim J-H. 2013. Study on Impact Analysis of Reducing Temperature

in Central Business Area by Installation of Tree Box Using ENVI-met, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation. 13(1): 221-228. [Korean Literature]

Online Resources

Seoul municipal ordinance of street planting and management. Article 6 and 7; [revised 2015. October 8]. Available from: <http://www.law.go.kr/>

Appendix

A. Envi-met 검증

다음은 수목 아래에서의 2017년 8월 22일 실측 대기 온도(measured)와 해당일 기상조건과 공간적 조건이 같은 Envi-met 기온수치(VS)를 상관 분석한 결과이다.

R square 값을 통해 Envi-met을 통한 수치가 검증되었다.

Model Summary^a

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the	Change Statistics				
					R Square	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.940 ^a	.883	.882	.58355	.883	2756.204	1	366	.000

a. Predictors: (Constant), measured

b. Dependent Variable: VS

B. Envi-met을 사용한 기존 연구

Chatzidimitriou A, Yannas S. 2005. Microclimatic Modifications of an Urban Street in Northern Greece. PLEA 2005 – The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Beirut, Lebanon, 689–694.

Crank PJ, Sailora DJ, Ban-Weiss G, Taleghani M. 2018. Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies. Urban Climate. 26: 188–197.

Huttner S, Bruse M. 2009. Numerical modeling of the urban climate – a preview on ENVI-MET 4.0, Seventh Int. Conf. Urban Clim. 1–4.

Perini K, Chokhachian A, Dong S, Auer T. 2017. Modeling and simulating urban outdoor comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by grasshopper. Energy and Building. 152: 373–384.

Salata F, Golasi I, de Lieto Vollaro R, de Lieto Vollaro A. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data, Sustain. Cities Soc. 26 (2016): 318–343.

Simon H, Linden J, Hoffmann D, Braun P, Bruse M, Esper J. 2018. Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. Landscape and Urban Planning 174: 33–40.

Tsoka S, Tsikaloudaki A, Theodosiou T. 2018. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. Sustainable Cities and Society. 43: 55–76.