

도시열섬현상완화를 위한 그린인프라 전략*

박채연¹⁾ · 이동근²⁾ · 권유진¹⁾ · 허민주³⁾

¹⁾ 서울대학교 협동과정조경학 박사과정 · ²⁾ 서울대학교 조경·지역시스템 공학부 · ³⁾ 서울대학교 대학원

Green-infra Strategies for Mitigating Urban Heat Island*

Park, Chae-Yeon¹⁾ · Lee, Dong-Kun²⁾ · Kwon, Eu-gene¹⁾ and Her, Min-ju³⁾

¹⁾ Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,

²⁾ Department of Landscape Architecture and Rural system Engineering, Seoul National University,

³⁾ Graduate School, Seoul National University.

ABSTRACT

Because of lack of accurate understanding of the mechanism of urban heat island (UHI) phenomenon and lack of scientific discussion, it is hard to come up with effective measures to mitigate UHI phenomenon. This study systematically described the UHI and suggested the solutions using green-infrastructure (green-infra). The factors that control UHI are very diverse: radiant heat flux, latent heat flux, storage heat flux, and artificial heat flux, and the air temperature is formed by the combination effect of radiation, conduction and convection. Green-infra strategies can improve thermal environment by reducing radiant heat flux (the albedo effect, the shade effect), increasing latent heat flux (the evapotranspiration effect), and creating a wind path (cooling air flow). As a result of measurement, green-infra could reduce radiant heat flux as 270 W/m² due to shadow effect and produce 170 W/m² latent heat flux due to evaporation. Finally, green-infra can be applied differently on the macro(urban) scale and micro scale, therefore, we should plan and design green-infra after the target objects of structures are set.

* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 17AUDP-B102406-03) 및 2017년도 BK21 플러스 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(서울대학교 협동과정조경학 그린인프라 창조 인재 양성팀).

First Author : Park, Chae-Yeon, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4885, E-mail : chaeyeon528@snu.ac.kr

Corresponding Author : Lee, Dong-Kun, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4875, E-mail : dklee7@snu.ac.kr

Received : 12 October, 2017. **Revised** : 31 October, 2017. **Accepted** : 23 October, 2017.

Key Words : *albedo, shade effect, evapotranspiration, thermal comfort*

I. 서 론

올 여름 서울에는 33일의 폭염특보가 발령되고, 열대야일수도 19일에 이르는 등 무더위가 기승을 부렸다. 이원경 인하대병원 예방관리팀과 박혜숙 이화여대의대 예방의학교실의 연구결과(Lee et al. 2016)에 의하면 1991~2012년 서울에서 폭염이 사망에 미치는 영향을 분석한 결과 서울의 경우 29.2℃ 이상에서 기온이 1도 더 오르면 사망률이 15.9% 높아졌다고 한다.

기후변화가 진행될 경우 우리나라의 폭염은 현재 9일에서 100년 후 64.7일로 증가하고, 열대야는 4일에서 59.9일로 증가될 것이다(기상청, 2012). 기후변화로 인해 미래에는 현재보다 더 많은 피해가 발생할 것으로 보이기 때문에 도시열섬완화를 위한 대책이 매우 중요하다고 할 수 있다.

실제로 이미 많은 지자체가 도시열섬완화대책을 마련하고 있다. 서울시는 올여름 기후변화와 도시열섬현상에 대응하기 위해 건물온도 완화대책으로 옥상 차열도료 도색(쿨루프)설치 지원 사업을 시행하고 있으며, 이 사업은 도심열섬현상의 주요 원인으로 지목되는 건물 옥상에 햇빛과 열의 반사효과와 방사효과가 있는 밝은 색 도료를 칠해 열기가 지붕에 축적되는 것을 막아주는 것으로 건물온도를 1℃ 낮출 수 있다고 한다(일요서울, 2017). 부산시는 도심열섬 완화대책으로 친수공간확보, 수목식재 등 4개 과제 16개 중점항목을 선정해 추진하고 있다(국제뉴스, 2017). 또한 도시 숲은 도시열섬 현상을 완화해 여름 한 낮 평균기온을 3~7℃ 낮출 수 있다는 기사도 있다(중앙일보, 2015). 현재 도시열섬완화를 위해 녹지조성, 그늘막, 도시농업, 녹색커튼, 차열도료 도색(쿨루프), 폭염예보, 물길조성, 바람길 설계, 도시관리계획 변경 등 많

은 정책을 실시하고 있지만 어느 정도 효과가 있는지에 대해서는 명확한 근거가 없다.

특히 최근에는 열섬에 대한 다양한 대책이 마련되고 있으나 열섬이 갖고 있는 복잡한 메커니즘에 대한 이해와 과학적 논의의 부족으로 마련된 대책의 효율성과 실효성이 미흡하다. 예를 들면 녹지나 수변공간 등에 의해 온도가 얼마나 저감되며 어느 정도의 녹지와 친수공간이 확보되어야지 온도를 저감시킬 수 있는지, 온도를 낮추는 것이 아니라 열을 낮추는 것이 필요한 것은 아닌지, 효과를 보기 위해서 온도를 정확하게 측정 하고 있는지 등의 질문이 남아있다. 과학적이며 객관적으로 밝혀내지 못한 것들이 남아 있음에도 불구하고 전문가들이나 언론에서는 한 가지 결과만 가지고 도시열섬완화에 도움 되는 것처럼 발표하는 경우가 많다.

도시열섬을 완화하기 위해 도입하고 있는 대책은 녹지와 친수공간을 포함하는 그린인프라를 이용하는 경우가 많다. 따라서 그린인프라 조성을 통해 어느 정도 도시열섬이 완화될 수 있는지 그동안의 많은 연구결과를 해석하고 정리하여 그 가능성과 한계를 열역학 메커니즘으로 서술할 필요성이 있다. 뿐만 아니라 시행되고 있는 도시열섬완화대책이 보행공간에도 도움이 되는지에 대한 검토가 필요하다. 도시규모에서와 미시규모에서의 열섬완화 방법에 대해 차이점에 대해서도 충분한 검토가 있어야 한다.

따라서 본고에서는 도시열섬완화에 대해 그린인프라의 관점에서 구체적인 전략과 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해서는 우선 열섬에 대한 발생 원인을 정확하게 서술하고, 그린인프라를 통한 도시열섬 완화전략에 대해 서술하고자 한다. 또한 도시전체의 열섬저감 뿐 아니라 보행공간의 열 쾌적성을 증진하기 위한 공간별 전략에 대해서도 서술하고자 한다. 또한 도시열

섬과 관련되는 도시공간별 온도를 정확하게 측정할 수 있는 온도계 등의 기기에 대해서도 제안하고 한다.

II. 도시열섬의 원인과 열 쾌적성

도시열섬현상이 주변보다 온도가 높아지는 현상을 의미하며, 온도가 증가하는 이유는 온도를 높이는데 사용되는 현열(sensible heat flux)이 증가하기 때문이다. 복사(radiation), 전도(conduction)의 과정을 거쳐서 공간 내 현열이 만들어지게 되며, 공기 순환과 같은 대류(convection)의 과정을 거쳐 우리가 느끼는 대기 온도가 만들어지게 된다(Ooka et al. 2008). 우리가 느끼는 온도는 위와 같이 복잡한 과정을 거쳐서 만들어지기 때문에, 영향을 주는 요인이 다양하다. 현열을 낮추기 위한 방안도 여러 가지이며, 현열을 낮췄다 해도 주변에서 뜨거운 바람이 불어온다면 온도가 높아질 수 있다. 따라서 온도는 전체의 복합적인 효과를 비교할 때 꼭 필요하지만, 미시규모에서는 온도만 비교할 경우 한계가 있을 수 있다(Park et al. 2016). 따라서 열 쾌적성과 같이 복사열 등 다양한 물리적 지표를 포함해 비교하는 것이 필요하다. 열 쾌적성은 미시규모에서 보행자가 느끼는 열 환경을 표현할 수 있기 때문에 도시열섬현상과 함께 고려하는 것이 필요하다.

1. 도시열섬완화효과 측정

현재 여러 지자체에서 이루어지고 있는 도시열섬완화대책은 과학적인 근거가 많이 부족한 상태이다. 많은 연구나 기사에서는 그린인프라 또는 다른 전략들이 도시의 온도를 낮출 수 있다고 얘기하지만, 일부는 대기온도가 아니라 표면온도를 가지고 얘기하는 경우가 많다. 지표면 온도는 대기온도보다 훨씬 변동 폭이 크기 때문에 도시열섬 완화효과가 과대추정 될 수 있다. 또한 대기온도를 이용할 때도 국제적으로 인정하고 있는 측정방법을 사용하지 않는 경우가 많다. 기상청에서 측정하고 있는 AWS(Automatic Weather Station)은 검증된 방법으로 측정하고 있지만, 건물 위에서 측정하기 때문에 도시의 내부 온도를 알기 위해서는 보정 방법을 추가로 사용해야 하며 또한 지점에 몇 개 없기 때문에 사용에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 복사열이 차단되고, 환기가 가능하게 만들어진 온도계(Figure 1-a)를 사용하여 그린인프라의 온도저감효과를 보여주고자 하였다. 또한 온도뿐만 아니라 열을 측정하기 위해 순복사계(CNR4 Net-radiometer, Kipp & Zonen Int.) (Figure 1-b)를 사용하여 사람이 받을 수 있는 단파, 장파복사열 값을 제시하였으며, 현재 가장 정확하게 증발량을 측정할 수 있는 부력식 증발팬(Figure 1-c)을 통해서 수공간의 증발량을 제시하였다. 각각의 열에 대한 설명은 아래 단락에 서술하였다.

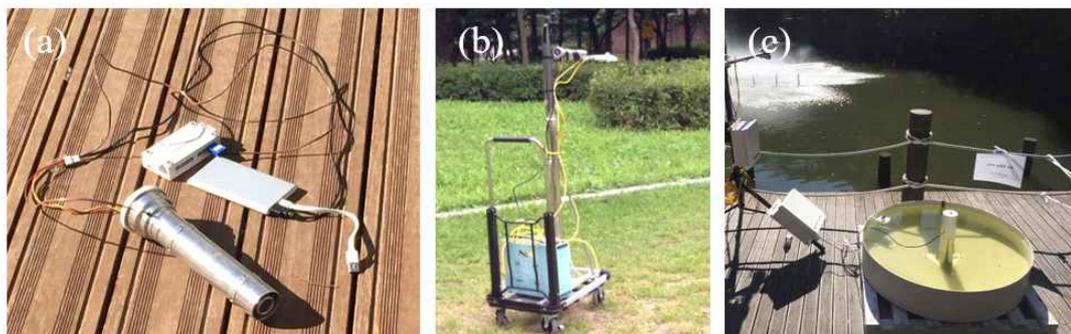


Figure 1. Measurement devices (a: thermometer, b: net radiometer, c: evaporator fan)

2. 도시열섬 발생원인

우선 가장 먼저 열이 어디서 발생하는지 알아야 할 필요가 있다. 열의 발생 원인은 자연열과 인공열로 나눌 수 있다. 자연적인 열원인 태양은 단파복사열(Shortwave radiation)을 발산하는데, 상대적으로 짧은 파장대의 복사열을 의미한다. 태양으로부터 나온 단파복사열은 도시표면으로 입사되는 과정에서 일부가 산란하며 도시 표면에는 직달단파복사열과 산란단파복사열 두 가지의 형태로 도달하게 된다(Gros et al. 2011). 지구의 대기와 표면은 입사된 단파복사열을 흡수하고 이를 통해서 자체적인 열을 갖게 되고 온도를 지니게 된다. 대기를 포함해서 온도를 지니는 모든 표면은 장파복사열(long-wave radiation)을 발산하며 (Grimmond, 1992), 표면온도가 높을수록 장파복사열이 커지게 된다. 단파복사열과 장파복사열은 표면에 닿을 때 흡수(absorption), 투과(transmission), 반사(reflection)를 하는데 이러한 반응이 무수히 일어나 표면이 흡수하는 복사열이 결정된다(Krayenhoff et al. 2014). 건축물의 밀도가 크고 높은 도시에서는 복사열을 도시공간 내 무수히 반사시켜 하늘로 나가지 못하게 하는데 이러한 현상을 트랩핑(Trapping) 이라고 한다(Oleson et al. 2008). 최종적으로 도시공간에 남아있는 단파복사열과 장파복사열의 합을 순복사열(Net radiation)이라 한다. 순복사열은 Equation 1로 정의 된다.

$$Q^* = \text{down}S - \text{up}S + \text{down}L - \text{up}L \quad \text{Equation 1}$$

$$Q^* = \text{순복사열}, \text{down}S = \text{입사되는 단파복사열}, \\ \text{up}S = \text{위로 나가는 단파복사열}, \\ \text{down}L = \text{입사되는 장파복사열}, \\ \text{up}L = \text{위로 나가는 장파복사열}$$

인공열(Anthropogenic heat)은 사람이 인공적으로 만들어내는 열로 인간에서 방출되는 열, 건물에서 만들어내는 열, 자동차에서 나오는 교통에너지 등을 의미한다(Grimmond, 1992). 따라서 인구와 교통이 밀집되어있거나 에너지사용량이 큰 건물이 많은 곳에 인공열이 많아지게 된다.

지금까지 연구된 인공열량을 보면 시, 공간적으로 큰 차이가 있음을 알 수 있다. Ichinose et al. (1999)는 도쿄의 인공열이 여름에는 $200\text{W}/\text{m}^2$, 겨울에는 $400\text{W}/\text{m}^2$ 라고 하였으며, Sailor and Lu (2004)는 미국의 대도시 인공열은 여름에 $60\text{W}/\text{m}^2$, 겨울에는 $75\text{W}/\text{m}^2$ 라고 발표한바 있다.

도시 내에 입사되고 발생하는 열을 복사열과 인공열이라 할 때, 온도를 증가시키는 현열은 다음과 같은 열 평형식(Heat balance equation)을 통해 나타낼 수 있다(Equation 2).

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_L + \Delta Q_S \quad \text{Equation 2}$$

$$Q_F = \text{인공열}, Q_H = \text{현열}, Q_L = \text{잠열}, \Delta Q_S = \text{저장열}$$

Equation 2에 따르면, 현열은 순 복사열과 인공열의 합에서 잠열이나 저장열을 뺀 것과 같다. 따라서 현열을 낮추려면 순 복사열과 인공열을 낮추거나, 잠열이나 저장열을 높이면 된다. 단, 여기서 저장열은 낮과 밤에 그 메커니즘이 반대가 되는데, 낮에는 열을 표면에 흡수함으로써 현열을 낮추는 역할을 하지만 밤에는 낮에 저장했던 열을 방출하게 되므로 열을 가중시키는 역할을 한다. 이처럼 다양한 작용을 통해 만들어진 현열은 대류 작용을 거쳐서 도시공간의 온도를 높이는 역할을 한다.

3. 열 쾌적성

지금까지 도시열섬을 완화하기 위한 정책을 시행할 경우 표면온도가 몇 도나 낮아지는지 혹은 대기온도가 몇 도나 저감되는지에 초점을 맞춰 그 효과를 평가했다. 도시 규모에서 평가할 때는 전체 도시의 온도를 몇 도나 저감할 수 있는지가 중요한 지표가 될 수 있지만, 옥외공간을 이용하는 보행자 측면에서는 대기온도가 몇 도 차이 나는지 보다 보행자가 느끼는 열 환경이 어떻게 변하는지가 중요하다.

열 쾌적성은 ‘열 환경에 대한 만족도를 표현하고 주관적인 평가에 의해 결정되는 마음의 상태’로 정의되며(ASHRAE Standard, 2004), 쾌적한 실내 환경을 나타내기 위해 개발된 것으로

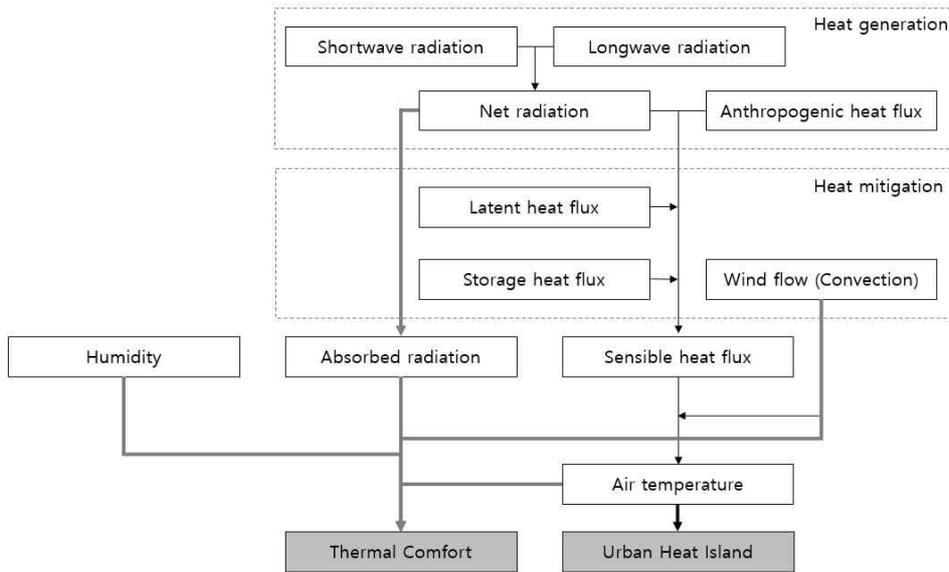


Figure 2. The mechanism of urban heat island index (air temperature) and thermal comfort index

예전부터 옥외공간에도 적용되어 왔다. Fanger (1973)는 인체와 주변 환경과의 정상상태 열 평형을 모델화하였으며, 이를 통해 사람이 느끼는 온열감을 7단계로 지수화 하였다. 이를 Predicted Mean Vote (PMV)라고 하며 현재까지 가장 많이 쓰이는 열 쾌적성 평가 지표이다. Höppe (1999)는 Physiological Equivalent Temperature(PET)를 인체 중심 온도와 피부 온도가 균형을 이룰 때 일반적인 조건이라고 정의하였다. 이 외에도 Standard Effective Temperature (SET) (ASHRAE Handbook, 2013), Universal Thermal Climate Index (UTCI) (Jendritzky et al. 2002; Jendritzky et al. 2012) 등 다양한 열 쾌적성 지표가 있다. 다양한 지표 값에는 조금씩 차이가 있지만 일반적으로 기온, 습도, 기류, 복사열 등의 물리적 변수와 심리적, 행태적 변수인 개인적 요소로 결정된다는 점이 동일하다.

도시공간의 여러 작용의 결과물인 온도를 비교하는 것보다 다양한 물리적 변수가 포함된 열 쾌적성을 함께 비교하는 것이 도시의 열 환경을 다각적인 면에서 설명할 수 있다는 점에서 의미가 있다. 실제로 여름철 그림자 아래로 들어갈

경우 시원해짐을 느낄 수 있지만 온도에는 큰 변화가 없다. 이에 반해 복사열은 크게 감소하기 때문에 열 쾌적성은 크게 감소한다. 도시열섬현상지표인 온도와 열 쾌적성지표의 메커니즘은 Figure 2와 같다.

III. 그린인프라에 의한 도시열섬완화대책

1. 그린인프라 조성에 의한 순복사열 저감

순복사열은 도시공간 내 남아있는 단파복사열과 장파복사열의 합이기 때문에 순복사열이 높아지면 현열이 높아지게 된다. 그린인프라는 복사열을 흡수하여 잠열을 생성하거나, 도시공간 밖으로 반사시키기 때문에 순 복사열을 줄일 수 있다.

그린인프라는 광합성을 위한 복사열을 흡수하며 이 때 흡수하는 열을 PAR(photosynthesis active radiation)라고 한다. PAR의 파장대는 400-700nm으로 단파복사에 포함되며, 식생의 종류에 따라 시간에 따라 흡수하는 양이 다르다(Lee 2011). 맑은 날 단파복사열이 가장 크게 입사될 시기에 숲은 최대 40%까지 흡수하며 흐린 날에

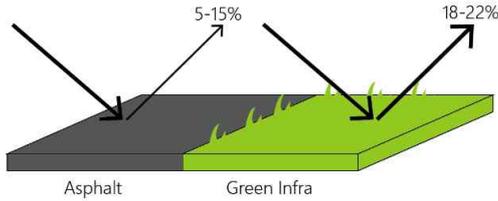


Figure 3. The albedo effect of green-infra

는 평균적으로 20%를 흡수한다(Dang et al. 1997).

복사열을 반사시키는 비율을 반사도(albedo)라고 한다. 반사도는 표면 재질에 따라서 달라지는데 아스팔트의 반사도가 0.05-0.15인 것에 비해서 녹지의 반사도는 0.18-0.22로 높으므로 복사열을 더 높은 비율로 반사시킬 수 있다(Taleghani et al. 2014) (Figure 3). 이는 그린인프라가 아스팔트보다 낮은 온도를 갖도록 한다. 도시 규모에서 개발된 도시와 비 개발된 도시의 반사도 차이는 극명하게 나타난다. 미국과 유럽의 반사도가 0.15-0.20로 낮은 것이 비해 남아프리카 마을의 반사도는 0.30-0.45로 높다(Taha, 1997). 특히 도심 중앙부로 갈수록 반사도가 낮아지는데, 이는 산림, 나지, 초지로 이루어진 토지피복을 아스팔트와 같은 불투수표면으로 변화시켰기 때문이다. 반사도가 낮아진 도시는 그 전보다 더 많은 열을 흡수하고 온도가 높아진다. 이처럼 중규모에서는 반사도가 온도변화에 큰 영향을 미치지 않지만, 미시규모에서는 반사도 외에 열 환경에 영향을 주는 요인이 많기 때문에 그렇지 못하다(Stemmers et al. 1998).

2017년 8월 22일, 강남구의 주거지역에서 순복사계로 입사되는 단파복사열과 반사되는 단파복사열을 그린인프라 위와 아스팔트 위에서 측정해본 결과 반사도가 각각 0.21, 0.13으로 그린인프라에서 높은 것을 알 수 있었다(Figure 4). 본 측정 지역에서는 그린인프라가 그림자 효과도 복합적으로 갖고 있어 입사되는 단파복사열이 아스팔트 지역보다(평균 738W/m²) 낮기 때문에 (496.9W/m²), 반사도가 높아도 반사되어 나가는



gray green

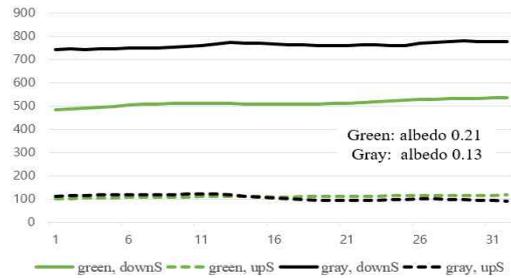


Figure 4. measured shortwave radiation on the gray pavement and green-infra and its albedo (downward shortwave radiation: downS, upward shortwave radiation: upS, x axis: time (sec), y axis: radiation flux (W/m²))

단파복사열이 약 100W/m²으로 동일하였다. 만약, 들어오는 단파복사열이 동일하다면 그린인프라에서 훨씬 많은 양의 열이 반사되어 나갈 것이다.

그린인프라는 복사열을 반사, 흡수한 후 남은 복사열을 아래로 투과시키기 때문에 그린인프라가 없는 곳보다 적은 양의 복사열을 투과시킨

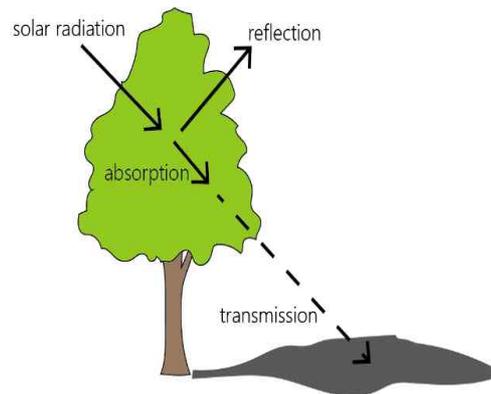


Figure 5. The shade effect of green-infra

다. 이를 그림자 효과(shading effect)라고 한다 (Figure 5). 그림자 효과는 투과성에 따라 혹은 생성하는 그림자의 면적에 따라 복사열을 차단 하기 때문에(Shashua-bar et al. 2006; Armson et al. 2012; Kong et al. 2016), 그린인프라의 종류, 수관 폭, 높이, 배치 등에 따라서 그 효과가 다르게 나타난다. Armson et al (2013)은 미시적 규모에서 수목의 엽면적지수(Leaf Area Index)를 통해서 그림자면적과 이에 따른 수목의 열저감 효과를 계산했다. 그 결과 수목의 유무에 따라 대기온도에는 유의한 차이가 없었지만 복사열 값을 이용해 산정한 평균 복사열 온도 (Mean Radiant Temperature)에는 3.8-4.6℃ 차이가 있었다.

2017년 9월 28일 오후 3시에 서초구 가로에서 그림자가 없는 곳과 가로수로 인해 그림자가 형성된 곳의 입사되는 단파복사열(downward solar radiation), 대기온도(air temperature)를 측정 한 결과 그림자가 없는 곳과 있는 곳의 대기온도는 각각 평균 21.75℃, 21.70℃으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 그러나 입사되는 단파복사열은 평균 363.22W/m², 94.69W/m²로 약 4배 정도 차이가 났다(Figure 6). 미시규모에서 그린인프라가 온도저감효과를 보이지 않아도 단파복사열은 약 270W/m² 저감할 수 있다는 것을 확인 했다.

반사도는 도시전체의 온도를 낮추기 위한 전략으로 중규모 스케일에서 많이 사용되거나 (Taha, 1997; Gago et al. 2013), 옥상재질 변화를 통한 도시열섬완화대책으로 연구되고 있다 (Li et al. 2014; Lee et al. 2015). 이에 반해 그림자효과는 수목 아래를 다니는 보행자에게 큰 영향을 주는 요인으로, 미시규모에서 도로 표면, 보행자 수준(screen level)의 열을 저감하는 전략으로 연구되고 있다(Wang et al. 2015; Redon et al. 2016).

그린인프라는 반사도 효과, 그림자 효과를 통해서 도시가 흡수하는 순복사열을 저감시킬 수

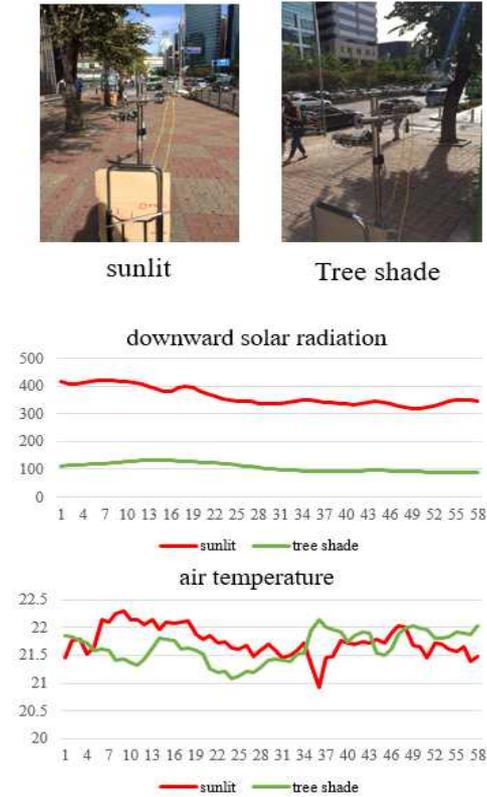


Figure 6. Measured downward solar radiation and air temperature on the sunlit and tree shade area (x axis: time (sec), y axis: radiant flux (W/m²) & air temperature (°C))

있다. 실제 측정 자료를 통해서 그린인프라의 반사도가 약 0.21로 아스팔트보다 0.08 크다는 것을 확인했으며, 그린인프라가 형성하는 그림자 아래에서는 입사되는 단파복사열을 75% 낮출 수 있다는 것을 확인했다. 그러나 실측값은 대상지에 따라, 측정되는 시간이나 기상조건에 따라서 다르게 나타나기 때문에 다양한 조건에서 측정할 필요가 있다.

2. 그린인프라 조성에 의한 잠열 증가

증발산을 통해 잠열을 형성하게 되면 열 평형식에서 상대적으로 현열이 감소하게 되어 온도가 낮아지는 효과를 갖게 된다. 그린인프라의 녹지와 토양에서는 수분이 수증기로 바뀌면서

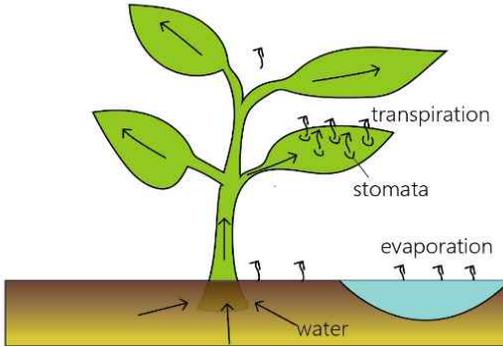


Figure 7. The effect of evapotranspiration of green-infra

증발잠열이 발생한다(Figure 7). 토양에서는 증발작용만 일어나지만, 녹지에서는 증발작용뿐만 아니라 잎의 기공에서 수분이 나가는 증산작용도 함께 나타나며 이를 증발산이라 통칭한다. 녹지의 증발산량은 기공 전도도를 이용하여 정량화된다(Krayenhoff et al. 2014). 일반적으로 기존 연구에서는 Penman-Monteith 방정식을 이용하여 토양과 녹지의 증발산량을 산정했다(Penman 1948; Monteith 1965; Zhou et al. 2010; Chalhoub et al. 2016). 그러나 이 산정식은 FAO에서 제안하고 있는 방법으로 그 대상이 농작물에 맞춰져 있기 때문에 정확한 산정을 위해서는 그린인프라에 맞춰진 식을 개발할 필요가 있다.

일부 연구에서는 Thermal dissipation probes (TDP) 혹은 gas analyzer 등을 통해서 증산으로 인해 생긴 식생의 물 손실량을 측정하고 있다. 그 중 TDP는 수목의 유속을 측정함으로써 지속

적인 증산량을 계산할 수 있다. Rahman et al (2017)은 측정을 통해 그린인프라의 평균 증산량이 $0.2-0.35 \text{ ml/cm}^2\text{min}$ 임을 밝혔으며, 증산량과 토양의 습도, 온도가 큰 상관성이 있음을 알아냈다.

감소된 수분량을 측정해서 얼마나 많은 잠열이 생성되는지 측정할 수도 있다. 수공간의 경우 증발팬을 통해 실제 증발량을 측정하는데, 부력추와 로드셀을 이용한 측정 방법을 사용하면 0.1mm 이하의 측정 정확도를 만족할 수 있어 신뢰성 있는 증발량을 측정할 수 있다(Lee, 2002). 위의 기계를 이용하여 2017년 9월 15일 24시간동안 서울대학교 지하연에서 측정한 증발량 변화양상은 Figure 8과 같다. 오후 4-5시에는 증발량이 최대로 되었으며 이때에 잠열이 약 170W/m^2 생성되었다. 즉, 현열을 170W/m^2 만큼 감소시켰으며 이로 인해 주변의 온도가 감소되었을 것이다.

일반적으로 미시규모에서는 복사열의 차이가 열 환경에 큰 영향을 미치기 때문에, 그린인프라가 갖는 그림자효과가 증발산효과보다 크게 작용한다. 그러나 그린인프라의 면적이 넓어지거나 연구의 규모가 커지는 경우(중규모 이상에서부터) 증발산효과가 우세해진다(Akbari et al. 1992; Zardo et al. 2017). 따라서 그린인프라는 그 설계 목적에 따라 그림자효과와 증발산효과 중 어떤 효과를 극대화할지 고려해야 한다. 예를 들어, 보행로의 열 환경을 개선하기 위함이

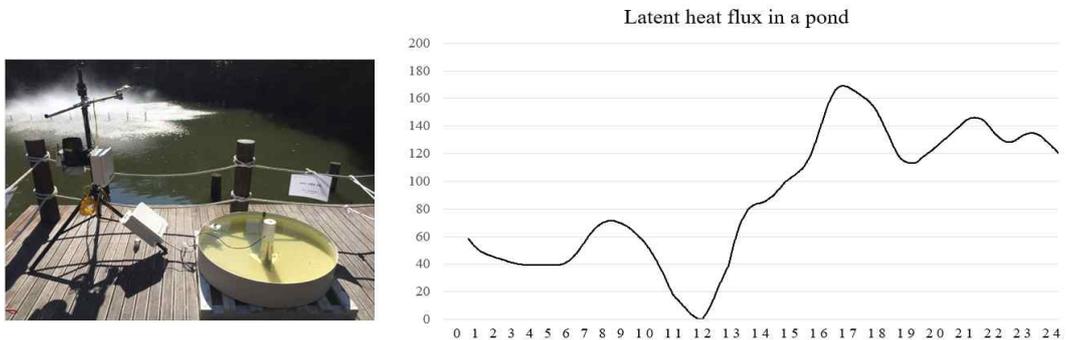


Figure 8. Measured latent heat flux in the pond using evaporator fan (x axis: time (hour), y axis: heat flux (W/m^2))

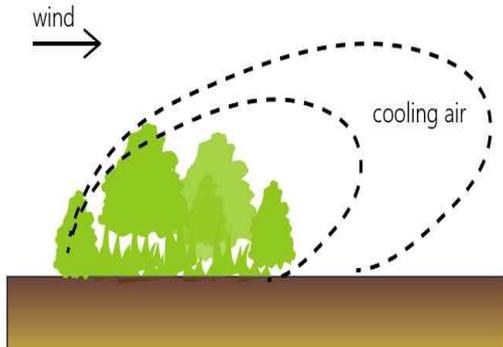


Figure 9. The effect of wind path of the green-infra. created cooling air can move into the wind path

면 그림자효과를 크게할 수 있는 수종과 크기, 배치를 선정해야 할 것이며, 넓은 면적의 식생을 통해서 도시 전체의 열 환경을 낮추는 것이 목적이라면 증발산량이 많은 수종을 선정해야 하며 토양의 습윤하게 유지시킬 수 있는 방안을 생각해야 한다.

3. 그린인프라 조성에 의한 바람길 조성

바람길이 조성되면 공기 대류가 활발해져 정체되어 있던 뜨거운 공기가 날려갈 수 있기 때문에 열섬현상을 완화시킬 수 있다. 뜨거운 공기는 밀도가 낮아져 위로 상승하고 빈 공간에 찬 공기가 들어오는 것이 대류의 원리다. 따라서 도심 곳곳에 그린인프라를 통해 냉섬(주변보다 온

도가 낮은 공간)을 조성하게 되면 찬 공기가 형성되어 불투수 비율이 높은 도심 쪽으로 바람이 형성 될 수 있다 (Figure 9). 실제로 쿨링효과가 큰 지역에서는 그린인프라 면적의 5배 거리에까지 영향을 미치며(Akbari and Taha, 1992), 도시 숲과 도시 공원에서 생성된 냉각효과는 각각 469, 391m 까지 영향을 준다(Jaganmohan et al. 2016). 스텝가든 같이 고도 차이를 활용한다면 찬 공기가 내려온다는 대류의 원리를 더 잘 활용할 수 있다. 도심보다 높은 고도에 위치한 그린인프라는 대기를 냉각시키며 생성된 냉기가 불어 내려올 수 있기 때문에 효과적으로 바람길을 생성할 수 있다.

2016년 8월 24일 낮 2시에 청계천 앞에서 도심 방향으로 난 길을 따라 온도를 측정 한 결과, Figure 10와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 약 40m까지 온도가 점차 증가하는데, 이것은 청계천에서 발생한 약 1℃ 낮은 찬 기류가 도심방향으로 약 40m까지 영향을 준다는 것을 의미한다.

그러나 미시규모에서 수목은 바람의 속도를 늦추는 역할을 한다. Taha et al (1991)는 온화한 상태에서 수목 아래의 풍속을 측정했을 때 주변보다 풍속이 평균적으로 2m/s 가 감소된 것을 확인했다. 풍속 저하 요소로는 수목뿐만 아니라 건물도 해당되는데 그린인프라로 형성한 냉섬

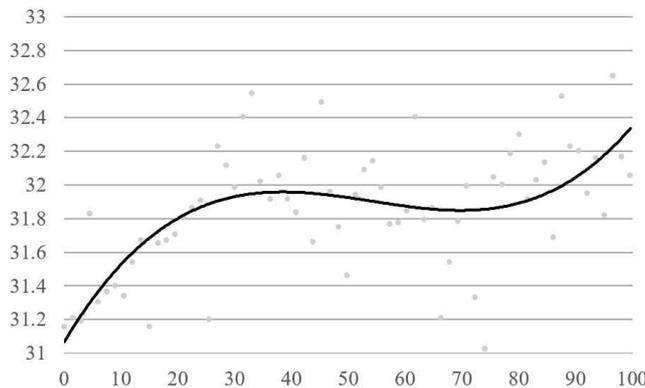


Figure 10. Measured air temperature(dots) and its trend line(line) in the road near the Cheonggye stream. (x axis: distance from the stream (m), y axis : air temperature (°C))

바로 앞에 높은 건물이 있을 경우 냉각 기류가 바깥으로 가는 것을 막을 수 있다(Jamei et al. 2016). 따라서 도시에 찬 공기가 형성될 수 있는 그린인프라를 조성하되, 바람길 내에는 풍속을 저하시킬 수 있는 건물이나 수목을 피하는 것이 좋다.

4. 공간 별 도시열섬완화 및 열 쾌적성 증진 전략

도시열섬완화대책은 목적이 되는 도시 공간 별로 다르게 이루어져야 할 필요가 있다. 그린인프라의 열 저감 전략을 세 가지: 순복사열 저감 (반사도 효과, 그림자 효과), 잠열 증가(증발산 효과), 바람길 조성으로 구분하였는데, Figure 11처럼 공간 규모 별로 그 효과를 적용시킬 수 있는 전략이 다르다. 중규모에서는 도시의 열섬 현상을 완화할 수 있는 것을 목적으로 하며 미시규모에서는 보행자의 열 환경 개선, 열 쾌적

성 증진을 목적으로 하는 것이 필요하다.

우선 반사도 효과에 대해서는 중규모와 미시 규모에서 모두 사용할 수는 있겠지만 서로 다른 효과를 낼 수 있다. 도시규모에선 옥상에 밝은 색 도료를 칠하거나 녹화를 해서 들어오는 열을 상당수 반사시키거나, 아스팔트와 같은 불투수 표면의 비율을 낮춤으로써 반사도를 높일 수 있다. 그러나 미시규모에서 보행자에 초점을 둔다면, 도로의 반사도를 높이면 도로에서 반사된 열이 보행자에게 입사되기 때문에 열 쾌적성을 저하시킬 수 있다. 따라서 피복 재질을 변화시킬 때는 도시전체의 영향뿐만 아니라 보행자에게 줄 수 있는 영향을 함께 고려해야 할 것이다.

그림자효과는 대부분 미시규모에서 고려되는데, 그림자효과는 물리적인 형태에 따라 크게 달라지므로 효과를 극대화하기 위해 건축물과 그린인프라의 공간 배치, 그린인프라의 규모와 방

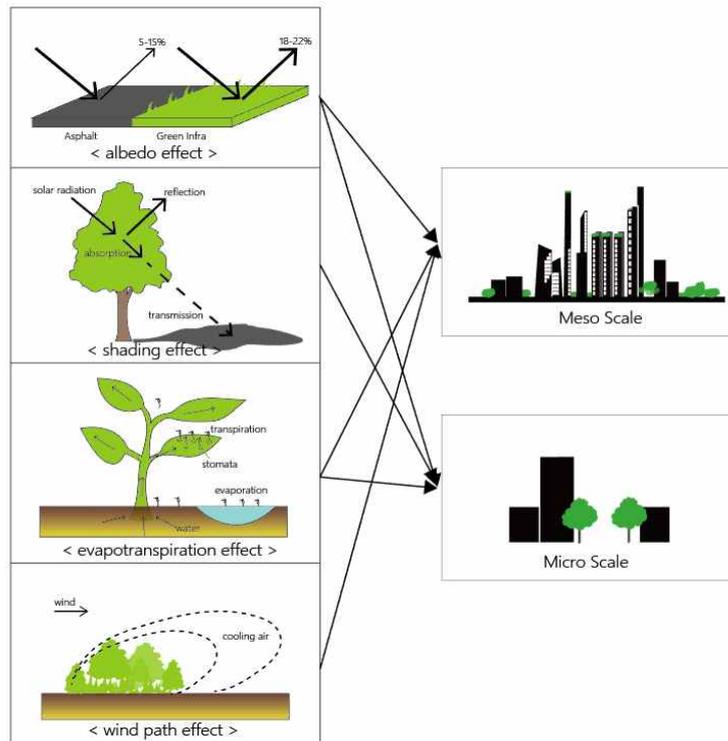


Figure 11. Different green-infra strategies which can be applied to meso(urban) scale and micro scale

향 등을 고려해야 한다. 주변 건물의 향이 동서일 때, 건물의 증발비가 작은 곳에서 그림자효과는 크게 나타난다(Oliveira et al. 2011; Cohen et al. 2012).

증발산 효과는 규모에 관계없이 도시열섬완화효과를 가진다. 그러나 증발산은 습도를 높이기 때문에 열 쾌적성을 낮출 수 있다. Potcher et al. (2006)는 습도와 온도가 모두 높은 지역에서 수목은 습도를 일정부분 높이더라도 온도저감 효과가 크기 때문에($\sim 3.5^{\circ}\text{C}$) 열 쾌적성을 높일 수 있지만, 밤에는 풍속을 낮추고 습도를 높이기 때문에 쾌적하지 못한 상태를 만들 수 있다고 주장했다. 따라서 우리나라와 같이 여름철 습한 기후를 가진 곳에서는 그린인프라 설계 시 열 쾌적성 지표를 이용하여 습도에 대한 고려를 함께 해야 할 것이다.

바람길 조성의 경우 도시규모에서는 냉섬을 만들어주는 것이 필요하며 (Kong et al. 2014), 미시규모에서는 원활한 통풍을 형성시키는 것이 필요하다. 냉섬에서 생성된 찬 기류는 주변으로 퍼지기 때문에, 주위에 바람 길을 만들어주면 훨씬 멀리까지 냉기류가 이동할 수 있다. Hong and Lin (2015)는 동일한 그린인프라가 있을 때 건축물의 배치를 어떻게 하는지에 따라 SET가 1.1°C 증가하며, 국지적으로 통풍이 안 되는 곳은 최대 6°C 증가한다고 했다. 그린인프라를 조성할 시에는 국지적인 통풍과 거시적인 바람 길을 모두 고려해야 할 것이다.

IV. 결 론

대부분의 사람들이 도시에 살고 있으며 도시화의 가속화와 기후변화에 의해 도시열섬현상이 더욱더 심각해 질 것으로 전망되고 있다. 최근에 열섬에 대한 피해 등이 보도되면서 이를 해결하고자 하는 많은 정책이 나오고 있지만, 그 효과가 명확하지 않고 체계적으로 정리된 바가 없다. 따라서 본고에서는 열섬에 대한 원인

을 체계적으로 서술하고 그린인프라 관점에서 도시열섬완화대책을 제시하였다.

첫째, 온도를 포함한 열 환경을 정확하게 측정할 수 있는 기기가 필요하다. 시중에서 많이 사용하고 있는 온도계는 고정식에 적합한 것으로 상대적인 온도 값은 비교적 측정이 가능하나 복사열의 영향을 받고 환풍이 안되기 때문에 절대적인 값을 측정하기에는 한계가 있다. 따라서 본고에서 제안한 온도계 등을 이용하여 절대적인 온도를 측정하는 것이 필요하다. 또한 열섬에 영향을 미치는 자연열과 인공열을 구분하고 이들 열은 물론이고 증발되는 물의 양을 정확하게 측정할 수 있어야 한다.

둘째, 그린인프라에 의한 도시열섬완화대책으로는 온도를 낮춘다는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 특히 미시규모에서는 대류로 인해 공간별 온도 차이가 거의 없을 수 있다. 따라서 열(복사열, 잠열, 현열)로 그 효과를 보거나 보다 다양한 요소를 고려하는 열 쾌적성지표를 함께 볼 필요가 있다. 본 논문에서는 도시의 순 복사열을 낮추기 위한 수목의 반사도와 그림자에 의한 열섬완화 효과를 서술하였다. 또한 측정을 통해 수목에 의해 $270\text{W}/\text{m}^2$ 정도의 복사열을 줄일 수 있음과 $170\text{W}/\text{m}^2$ 정도의 증발산효과가 가능함을 서술하였다. 또한 바람 길에 의해서 냉각된 기류가 40(청계천)~469(도시숲)m 정도 효과를 미친다는 것을 알 수 있었다. 단, 그린인프라의 열 저감 효과는 대상지와 날씨에 따라 달라질 수 있기 때문에 반복 측정을 통해서 정량화 하거나 물리적인 수식을 이용해서 계산해야 할 필요가 있다.

셋째, 도시규모에서만뿐만 아니라 미시규모에서 보행공간의 열 쾌적성을 높이기 위한 그린인프라의 전략도 함께 서술하였다. 바닥 표면의 반사도를 높이는 전략과 증발산열을 높이는 전략은 도시 전체의 온도를 낮추는데 도움이 될 수 있지만, 너무 높은 반사도를 갖는 바닥재질을 사용하거나 증발산을 통해 습도를 높일 경우 보행

자의 열 환경을 악화시킬 수 있기 때문에 목적에 따라 적합한 방법이 고려되어야 할 것이다.

References

- Akbari, H. and H. Taha. 1992. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four canadian cities. *Energy* 17: 141-149.
- Akbari, H. · S. Davis · S. Dorsano · J. Huang and S. Winnett. 1992. *Cooling Our Communities: A Guidebook On Tree Planting And Light-Colored Surfacing*. Climate Ch. Washington, DC (United States): Environmental Protection Agency.
- Ansi/Ashrae. 2004. ANSI/ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *Ashrae* 2004: 30. doi:10.1007/s11926-011-0203-9.
- Armsom, D. · P. Stringer and A. R. Ennos. 2012. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry and Urban Greening* 11. Elsevier GmbH.: 245-255. doi:10.1016/j.ufug.2012.05.002.
- Armsom, D. · M. A. Rahman and A. R. Ennos. 2013. A Comparison of the Shading Effectiveness of Five Different Street Tree Species in Manchester , UK. *arboriculture & urban forestry* 39: 157-164.
- ASHRAE Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2013. *ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI); Climatic design information*.
- ASRAE Standard. 2004. ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90. 1-2004. *Energy Standard for Building except Low-Rise Residential Buildings*.
- Chalhoub, M. · M. Bernier · Y. Coquet and M. Philippe. 2016. A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. *Renewable Energy* 103. Elsevier Ltd: 295-307. doi:10.1016/j.renene.2016.11.027.
- Cohen, P. · O. Potchter and A. Matzarakis. 2012. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. *Building and Environment* 51. Elsevier Ltd: 85-295. doi:10.1016/j.buildenv.2011.11.020.
- Dang, Q.-L. · H. A. Margolis · M. Sy · M. R. Coyea · G. J. Collatz and C. L. Walthall. 1997. Profiles of photosynthetically active radiation, nitrogen and photosynthetic capacity in the boreal forest: Implications for scaling from leaf to canopy. *Journal of Geophysical Research* 102: 28845-28859. doi:10.1029/97JD00194.
- Fanger, P. O. 1973. Assessment of thermal comfort practice. *Occupational and Environmental Medicine* 30: 313-324. doi:10.1136/oem.30.4.313.
- Gago, E. J. · J. Roldan · R. Pacheco-Torres and J. Ordóñez. 2013. The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25. Elsevier: 749-758. doi:10.1016/j.rser.2013.05.057.
- Grimmond, C. S. B. 1992. The Suburban Energy-Balance-Methodological Considerations and Results for a Midlatitude West-Coast City Under Winter and Spring Conditions Rid A-2179-2009. *International Journal of Climatology* 12: 481-497. doi:10.1002/joc.3370120506.
- Gros, A. · E. Bozonnet and C. Inard. 2011.

- Modelling the radiative exchanges in urban areas: A review. *Advances in Building Energy Research* 5: 163-206. doi:10.1080/17512549.2011.582353.
- Hong, B. and B. Lin. 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. Elsevier Ltd: 18-27. doi:10.1016/j.renene.2014.05.060.
- 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. doi:10.1007/s004840050118.
- Ichinose, T. · K. Shimodozono and K. Hanaki. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33: 3897-3909. doi:10.1016/S1352-2310(99)00132-6.
- Jaganmohan, M. · S. Knapp · C. M. Buchmann and N. Schwarz. 2016. The Bigger, the Better? The Influence of Urban Green Space Design on Cooling Effects for Residential Areas. *Journal of Environment Quality* 45: 134. doi:10.2134/jeq2015.01.0062.
- Jamei, E. · P. Rajagopalan · M. Seyedmahmoudian and Y. Jamei. 2016. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54. Elsevier: 1002-1017. doi:10.1016/j.rser.2015.10.104.
- Jendritzky, G. · A. Maarouf · D. Fiala and H. Staiger. 2002. An update on the development of a universal thermal climate index. In: 15th Conf. Biomet. Aerobiol. And 16th ICB02, 27 Oct–1 Nov 2002, Kansas City, AMS: 129-133. doi:10.1029/2002JD002184.Woo.
- Jendritzky, G. · R. de Dear and G. Havenith. 2012. UTCI-Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology* 56: 421-428. doi:10.1007/s00484-011-0513-7.
- Kong, F. · H. Yin · C. Wang · G. Cavan and P. James. 2014. A satellite image-based analysis of factors contributing to the green-space cool island intensity on a city scale. *Urban Forestry & Urban Greening* 13. Elsevier GmbH.: 846-853. doi:10.1016/j.ufug.2014.09.009.
- Kong, F. · W. Yan · G. Zheng · H. Yin · G. Cavan · W. Zhan · N. Zhang and L. Cheng. 2016. Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* 217. Elsevier: 22-34.
- Krayenhoff, E. S. · A. Christen · A. Martilli and T. R. Oke. 2014. A Multi-layer Radiation Model for Urban Neighbourhoods with Trees. *Boundary-Layer Meteorology* 151: 139-178. doi:10.1007/s10546-013-9883-1.
- Lee, B.-Y. 2002. Short-term Variation in Class A Pan Evaporation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 4: 197-202.
- Lee, S. 2011. Further Development of the Vegetated Urban Canopy Model Including a Grass-Covered Surface Parametrization and Photosynthesis Effects. *Boundary-Layer Meteorology* 140: 315-342. doi:10.1007/s10546-011-9603-7.
- Lee, S. · Y. Ryu and C. Jiang. 2015. Urban heat mitigation by roof surface materials during

- the East Asian summer monsoon. *Environmental Research Letters* 10. IOP Publishing: 124012. doi:10.1088/1748-9326/10/12/124012.
- Lee, W. K. · H. A. Lee and H. Park. 2016. Modifying effect of heat waves on the relationship between temperature and mortality. *Journal of Korean Medical Science* 31: 702-708. doi:10.3346/jkms.2016.31.5.702.
- Li, D. · E. Bou-Zeid and M. Oppenheimer. 2014. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters* 9. IOP Publishing: 55002. doi:10.1088/1748-9326/9/5/055002.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*. doi:10.1613/jair.301.
- Oleson, K. W. · B. Bonan · J. Feddema · M. Vertenstein and C. S. B. Grimmond. 2008. An urban parameterization for a global climate model. Part 1: Formulation and evaluation for two cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47: 1038-1060. doi:10.1175/2007JAMC1597.1.
- Oliveira, S. · H. Andrade and T. Vaz. 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment* 46: 2186-2194. doi:10.1016/j.buildenv.2011.04.034.
- Ooka, R. · H. Chen and S. Kato. 2008. Study on optimum arrangement of trees for design of pleasant outdoor environment using multi-objective genetic algorithm and coupled simulation of convection, radiation and conduction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96: 1733-1748. doi:10.1016/j.jweia.2008.02.039.
- Park, C. · D. K. Lee · S. Sung · J. Park and S. Jeong. 2016. Analyzing the Diurnal and Spatial Variation of Surface Urban Heat Island Intensity Distribution - Focused on 30 cities in Korea -. *Journal of Korea Planning Association* 51: 125-136.
- Penman, H. L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 193: 120-145.
- Potcher, O. · P. Cohen and A. Bitan. 2006. Climatic Behavior of Various Urban Parks During Hot and Humid Summer in The Mediterranean City of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology* 26: 1695-1711. doi:10.1002/joc.
- Rahman, M. A. · A. Moser · T. Rötzer and S. Pauleit. 2017. Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 232. Elsevier B.V.: 443-456. doi:10.1016/j.agrformet.2016.10.006.
- Redon, E. · A. Lemonsu · V. Masson · B. Morille and M. Musy. 2016. Implementation of street trees in solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development Discussions*: 1-46. doi:10.5194/gmd-2016-157.
- Sailor, D. J. and L. Lu. 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment* 38: 2737-2748. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.01.034.
- Shashua-bar, L. · M. E. H. Å and Y. Tzamir. 2006. Integrated thermal effects of generic

- built forms and vegetation on the UCL microclimate. *building and* 41: 343-354. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.032.
- search & Information 26: 103-112. doi:10.1080/096132198370029.
- Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings* 25. Elsevier: 99-103.
- Taha, H. · H. Akbari and A. Rosenfeld. 1991. Heat Island and Oasis Effects of Vegetative Canopies : Micro-Meteorological Field-Measurements. *Journal of Applied Climatology* 44: 123-138.
- Taleghani, M. · D. J. Sailor · M. Tenpierik and A. van den Dobbelsteen. 2014. Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA. *Building and Environment* 73. Elsevier Ltd: 138-150. doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.006.
- Wang, Y. · F. Bakker · R. De Groot · H. Wortche and R. Leemans. 2015. Effects of urban trees on local outdoor microclimate: synthesizing field measurements by numerical Steemers, K. · N. Baker · D. Crowther · J. Dubiel and M. Nikolopoulou. 1998. Radiation absorption and urban texture. *Building Re-modelling. Urban Ecosystems*: 1305-1331. doi:10.1007/s11252-015-0447-7.
- Zardo, L. · D. Geneletti · M. Pérez-soba and M. Van Eupen. 2017. Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services* 26. Elsevier B.V.: 225-235. doi:10.1016/j.ecoser.2017.06.016.
- Zhou, Y. · Y. Wang · A. J. Gold and P. V. August. 2010. Modeling watershed rainfall-runoff relations using impervious surface-area data with high spatial resolution. *Hydrogeology Journal* 18: 1413-1423. doi:10.1007/s10040-010-0618-9.
- www.climate.go.kr/home/bbs/view.php?bname=senario&vcode=4673
- www.gukjenews.com/news/articleView.html?idxno=774053
- m.ilyoseoul.co.kr/news/articleView.html?idxno=201448#_adtep
- news.joins.com/article/18353315