

# InVEST 도시냉각모형을 이용한 도시녹지의 주·야간 냉각 효과 평가\*

권혁수\*\* · 김장수\*\*\*

## Evaluation of Day and Night Cooling Effects of Urban Green Spaces using the InVEST Urban Cooling Model\*

Hyuksoo Kwon\*\* · Jangsoo Kim\*\*\*

**요약 :** 이 연구는 InVEST 도시냉각모형을 활용하여 얻어진 열 완화 지수 결과를 원격탐사자료의 주간 및 야간 지표면 온도와 비교하여 상관성을 분석하였다. 연구 결과, 녹지가 주간은 최대 250m, 야간은 최대 350m까지 냉각 효과를 나타냈으며, 주간과 야간의 냉각 효과에 차이가 있었다. 녹지의 주간과 야간 냉각 효과의 최대거리에 대한  $R^2$  값이 100m에서 150m 사이에서 큰 변화를 보였으나, 그 이후 거리에서는 변화가 미미했다. 특히 야간은 100m 구간까지  $R^2$ 가 0.42를 넘지 못하며 주간보다 설명력이 현저히 낮았다. 이는 야간의 녹지에 따른 냉각 거리효과가 유의미하지 않다는 것을 의미한다. 이 연구는 주간 지표면 온도 자료를 사용하는 기존 도시열섬 연구와 달리 주간 및 야간 지표면 온도 자료를 모두 사용하였으며, 주로 야간에 발생하는 도시열섬 현상의 특성을 분석하였다. 야간은 식물이나 토양수분의 증발산이 감소하므로, 식생에 의한 도시열섬 완화효과가 제한적이었다. 이러한 결과는 도시계획 및 녹지설계에 있어서 중요한 시사점을 제공할 수 있다.

**주요어 :** InVEST 도시냉각모형, 지표 온도, 열완화지수, 냉각가능거리, 도시열섬

**Abstract :** This study analyzed the correlation of the heat mitigation index results obtained from the InVEST urban cooling model by comparing them with daytime and nighttime LST from remote sensing data. As a result, the maximum distance of the cooling effect of green space during the day was evaluated to be 250 m, and the maximum distance of the cooling effect at night was evaluated to be 350 m. Through this, the difference in the cooling effect of green space during the day and night could be confirmed. However, the peak of  $R^2$ , the maximum distance of the daytime and nighttime cooling effect of green space, changes significantly when moving from 100 m to 150 m, and the amount of change is minimal in the subsequent section. In particular, given that  $R^2$  does not exceed 0.42 up to 100 m at night and its explanatory power is very low compared to the daytime, the cooling distance effect of green space at night can be considered to be insignificant. While most UHI studies analyzed using daytime LST, this study used daytime and nighttime LST data to analyze the characteristics of the UHI phenomenon that occurs mainly at night through HMI. As a result, it was confirmed that evapotranspiration to plants and soil moisture was reduced at night compared to daytime, so the UHI mitigation effect due to vegetation was limited.

**Key Words :** InVEST urban cooling model, LST, HMI, Green area cooling distance, Urban heat island(UHI)

\*이 논문은 국립생태원 “생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립(23)(NIE-고유연구-2023-3)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

\*\*국립생태원 선임연구원(Senior Researcher, National Institute of Ecology, ulmus@nie.re.kr)

\*\*\*공주대학교 지역개발연구소 연구교수(Research Professor, Institute of Regional Development Research, Kongju National University, matra99@kongju.ac.kr)

## I. 서론

도시화로 인하여 도시열섬과 미세먼지 등 계절성 환경문제는 갈수록 심각해지고 있으며, 그로 인한 삶의 질과 건강, 노동생산성 등의 피해가 늘어나고 있다. 이 중 도시열섬은 도시 내 불투수층의 증가로 인해 지표면 온도 상승, 냉방 등에 따른 인공 열의 증가, 오염물질 방출에 따른 대기의 온실효과, 고밀도 도시 공간구조에 따른 대기 흐름 방해 등이 주요 원인이다(윤기학, 2012; 양병선·허한결, 2021). 1995년 미국 중서부 폭염과 2003년 유럽 폭염, 1996년 시카고와 2012년 파리는 도시열섬효과와 폭염의 위험한 결합으로 인해 높은 사망자가 발생하였다(Sharma *et al.*, 2016). 최근 이를 저감할 수 있는 대책 중 하나로 도시녹지 조성을 통한 도시열섬 완화 방안이 주목받고 있다. 특히 도시녹지는 태양열을 흡수하고 그늘을 제공하며, 수증기를 방출하여 기온을 낮춘다. 이를 통해 냉방장치 사용을 줄여 전력 사용량 절감에 도움을 준다(김병찬 등, 2020; 양병선·허한결, 2021). 이 때문에 도시공간 내 열수지 및 도시열섬 완화 기능에 대한 도시녹지의 규모와 형태, 용도지역, 에너지 저감 등 다양한 연구가 진행되고 있다(오규식·홍재주, 2005; 송봉근·박경훈, 2015; 박종화·조기혁, 2016; 김근희 등, 2018). 이러한 녹지의 효과를 분석하기 위해 많은 연구에서는 원격탐사 자료의 열 센서를 사용하고 있는 것으로 확인하였다(박종화·조기혁, 2016; 김근희 등, 2018; 김태현 등, 2018; 김근한 등, 2021; 권혁수·김장수, 2022). 추가로 영상과 현장조사 결과의 상관성을 보거나 현장조사 결과를 활용한 분석을 통해 영상 분석의 결과들을 뒷받침하기도 한다(조현길·안태현, 2006; 김미경 등, 2014; 김동우 등, 2019; 김건형 등, 2020).

도시공간 내 건물, 도로, 주차장 등의 인공구조물은 태양 복사열을 흡수하고 저장하는 경향이 있다. 이러한 특징은 도시가 주변의 농촌 지역보다 온도가 높아지는 현상을 유발한다. 이 현상은 특히 밤에 두드러지며, 이에 따라 에너지 사용량이 증가하고, 대기질이 악화되며, 건강 위험이 증가하게 된다(Oke, 1982). 따라서 야간 도시열섬 저감은 도시 생활환경을 개선하는 데 중요한 역할을 한다. 연구자들은 원격탐사 자료를 활용하여 야간의 도시냉각 효과를 분석한 결과 식생의 유형과 규모, 형태에 따라 그 효과가 다르게 나타나는 것을 파악하고 최적의 녹지 크기와 형태, 지표 등을 제시하였다(Zhang *et*

*al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Anand and Sailor, 2023). 또한 원격탐사 센서뿐만 아니라 모바일이나 모델 등을 사용하여 좀 더 상세한 결과를 분석하고, 이를 도시 및 녹지계획에 적용할 방안을 제시하였다(Oliveira *et al.*, 2011; Shashua-Bar *et al.*, 2011; Hamada *et al.*, 2013)

따라서 본 연구는 InVEST 도시냉각모형에서 얻어진 열완화지수(Heat Mitigation Index, 이하 HMI) 결과를 원격탐사 자료의 주·야간 지표온도(Land Surface Temperature, 이하 LST)와의 비교를 통해 상관성을 밝히고자 하였다. 도시열섬 연구의 대부분이 주간 LST를 이용하여 분석한 것에 비해, 본 연구에서는 주·야간 LST 자료를 이용하여 주로 야간에 발생하는 도시열섬 현상의 특성을 HMI를 통해 해석해 보고 이에 따른 한계를 기술하고자 한다.

## II. 연구 지역 및 연구 방법

### 1. 연구 지역

연구 지역은 서울시 중남부에 위치한 동작구와 관악구 지역이다(그림 1). 동작구는 과거 한강의 남포 북을 잇는 수로 교통의 요충지로 예부터 주거지역이 구릉지를 중심으로 형성된 지역이다. 동작구의 전체 면적은 1,636ha이며, 인구는 약 39.4만 명이다. 동작구의 녹지 면적은 약 220ha로 동작구 전체 면적의 약 13.7%를 차지하고 있다(동작구, 2023). 관악구는 남쪽의 관악산(632m), 서쪽의 호암산(393m), 동쪽의 우면산(312.6m)을 연결하는 능선으로 둘러싸인 서울의 남쪽 경계 구로 전체 면적은 2,956ha, 인구는 약 48.5만 명이다. 관악구의 녹지 면적은 약 1,380ha로 관악구 전체 면적 중 약 46.8%를 차지하고 있다(관악구, 2023).

해당 연구 지역은 관악산이나 현충원과 같은 대형 산림과 녹지, 한강과 같은 수체, 그 사이에 중소형 녹지와 시가지 지역들이 적절히 분포되어 녹지에 따른 열섬 저감 효과를 다양하게 측정하기에 유리한 지역이다.

### 2. 연구 방법

#### 1) 토지 피복

InVEST 도시냉각모형을 이용한 HMI 산출을 위해 사용된 토지피복도는 2022년도에 촬영되어 제작된 1:5,000

세분류 토지피복도 55도엽을 하나의 Raster 파일로 제작하였다(그림 2). 작성된 토지피복도는 총 29종류의 세분류가 존재한다. 활엽수림은 980.7ha로 가장 넓으며, 혼합지역으로 면적은 3.3ha로 가장 좁은 것으로 나타났다(표 1). 본 연구지역인 동작구와 관악구는 국립현충원, 보라매공원, 관악산, 용마산, 국사봉 등 비교적 넓은 초지와 산지가 분포하는 지역으로 전체 면적 중 약 42.7%가 도시 내 냉각 효과를 발생시킬 수 있는 녹지로 분류되었다.

## 2) InVEST 도시냉각모형

미국 Stanford 대학에서 제작된 InVEST 도시냉각모형은 토지피복과 열에 관련한 매개변수들을 통해 열 완화지수(HMI)를 산출할 수 있다. 이 모형은 특정 녹지가 가지는 냉각 용량을 고려하여, 해당 지역의 토지피복에 대한 도시녹지 냉각용량을 추정하는 HMI 지도를 생성한다.

도시냉각모형은 대상 지역의 각 토지피복에 대한 그림자 지수(shade), 증발산 지수(ETI), 알베도(Albedo)를 기반으로, 각 지점에 대한 냉각용량(CC) 지수를 산출한다. 냉각용량(CC)은 그림자 지수, 증발산 지수 및 알베도의 가중 합수로 계산된다(식 1). 이 방정식은 도시녹지에 물이 충분히 공급된다는 것을 가정한다. 냉각 용량

지수를 평가할 때 고려하는 주요 요소 가중치는 경험적 데이터를 바탕으로 설정된다.

$$CC_i = 0.6 * shade + 0.2 * albedo + 0.2 * ETI \quad (1)$$

2ha 이상 녹지공간의 주변 냉각효과를 설명하기 위해, 면적이 큰 녹지공간의 영향은 녹지공간과 분석 픽셀의 냉각용량(CC) 값의 거리 가중 평균으로 계산되며, 영향을 받지 않는 경우 열완화(HM)는 냉각용량(CC)과 같다고 가정한다(Natural Capital Project).

입력된 토지피복도는 2022년 환경부에서 제공하는 세분류 토지피복도 55도엽을 합친 후, Raster로 변환하여 사용하였다. 기준 증발산 지수(ET0)는 1971년 국제 협력으로 설립된 국제농업연구자문그룹의 공간정보 컨소시엄(CGIAR-CSI)이 제공하는 전지구 건조도 지수 및 잠재 증발량 데이터베이스(Global-AI\_PET\_v3)에서 제공하는 증발산 지수를 분석에 이용하였다. 전 지구 잠재 증발량 자료는 월간 및 연간 자료를 제공하며, 약 90m의 공간해상도를 갖는다. 본 연구에서는 연간 잠재 증발량 자료를 이용하였다(CGIAR-CSI, <https://csidotinfo.wordpress.com/>).

도시냉각모형의 Kc 값은 InVEST 모형에서 제공하는

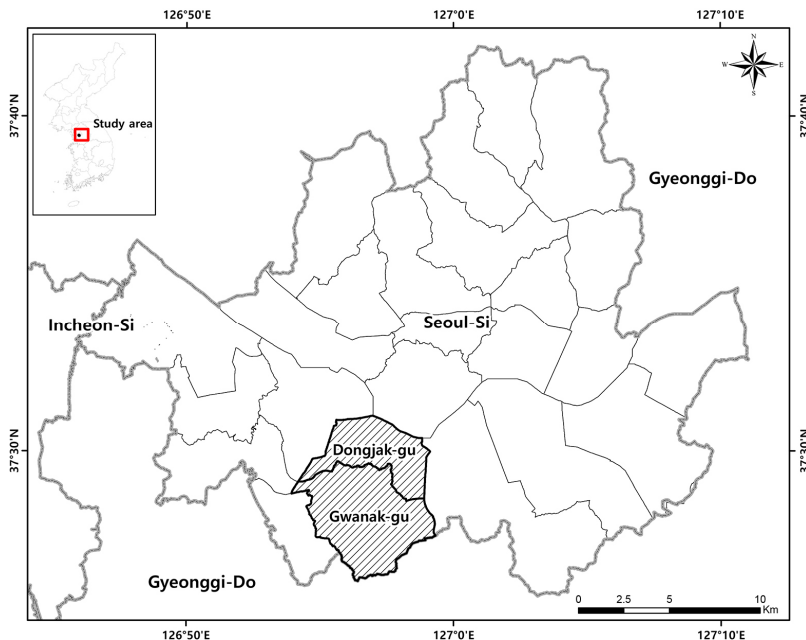


그림 1. 연구 지역 위치도

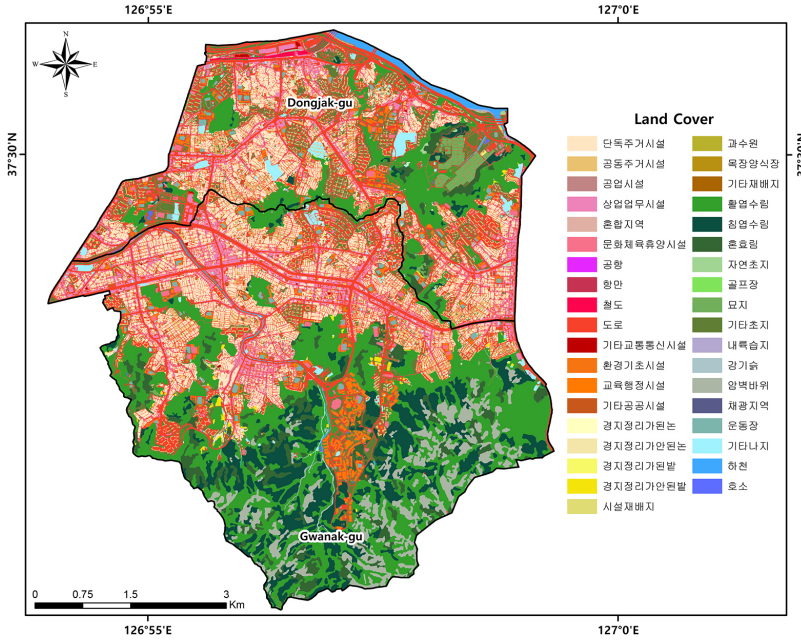


그림 2. 토지피복 분포도

표 1. 연구지역 내 토지피복별 분포 면적

토지피복(세분류)	면적(ha)	토지피복(세분류)	면적(ha)
단독주거시설	538.7	기타재배지	0.2
공동주거시설	266.6	활엽수림	980.7
공업시설	0.5	침엽수림	391.8
상업업무시설	288.2	혼효림	209.7
혼합지역	0.5	자연초지	5.9
문화체육휴양시설	47.1	묘지	32.6
철도	11.2	기타초지	340.6
도로	987.5	내륙습지	2.5
기타교통통신시설	3.3	강기슭	3.3
환경기초시설	0.7	암벽바위	195.9
교육행정시설	93.5	운동장	36.7
기타공공시설	43.6	기타나지	63.6
경지정리가된밭	0.3	하천	35.0
경지정리가안된밭	14.4	호소	1.7
시설재배지	0.3		

Kc Calculator를 통해 산출하였다(Natural Capital Project). 해당 생태계 유형에 맞는 적합한 Biophysical table을 생성할 수 있도록 작물 및 생태계 유형에 대한 생장곡선과 유엔식량농업기구(FAO) 등의 다양한 참고자료를 제공하고 있다(Natural Capital Project). Biophysical Table은

생물리적 값이 기재된 CSV 형식의 표로, 각각의 정보 필드와 토지피복 분류가 고유 코드를 통해 연결되어 분석에 이용된다. InVEST 도시냉각모형은 토지피복별 그림자 지수(shade), 작물계수(Kc), 알베도(Albedo), 녹지공간(Green area), 건물밀도(Building intensity) 등이 사용

된다. 그림자 지수 경우, Natural Capital Project에서 제공하는 자료와 Zawadzka, *et al.*(2021), 권혁수와 김장수(2022) 연구에서 제시된 식생 높이와 토지피복별 지수를 활용하여 지수를 재산정하였다. 알베도 값은 국내 일부

도시 및 남한 전 지역을 대상으로 알베도를 작성한 박은빈 등(2012)과 송철호(2015), 이용관 등(2022)의 연구 결과의 연평균 값을 인용하였다(표 2).

도시냉각모형에 입력되는 사용자 입력값은 생물리치

표 2. Biophysical Table 입력 값

Code No.	토지피복 Landcover	그림자 Shade	작물계수 Kc	알베도 Albedo	녹지 Green area	건물밀도 Building intensity
1	단독주거시설	0.18	0	0.126	0	0.3
2	공동주거시설	0.05	0	0.126	0	0.95
3	공업시설	0.05	0	0.126	0	0.3
4	상업업무시설	0.05	0	0.126	0	0.3
5	혼합지역	0.3	0	0	0.3	0.3
6	문화체육휴양시설	0.18	0	0.126	0	0.3
7	공항	0.45	0	0.122	0	0.1
8	항만	0.45	0	0.122	0	0.1
9	철도	0.45	0	0.122	0	0.1
10	도로	0.45	0	0.122	0	0.1
11	기타 교통 통신시설	0.45	0	0.122	0	0.1
12	환경기초시설	0.05	0	0.126	0	0.3
13	교육행정시설	0.05	0	0.126	0	0.3
14	기타 공공시설	0.05	0	0.126	0	0.3
15	경지정리가된 논	0.65	0.68	1	1	0
16	경지정리가 안 된 논	0.65	0.68	1	1	0
17	경지정리가 된 밭	0.65	0.6	1	1	0
18	경지정리가 안 된 밭	0.65	0.6	1	1	0
19	시설재배지	1	0	0.133	0	0
20	과수원	0.7	0.84	1	1	0
21	목장양식장	0.85	0.82	1	1	0
22	기타재배지	1	0.82	0.133	1	0
23	활엽수림	1	0.88	0.095	1	0
24	침엽수림	1	0.68	0.095	1	0
25	혼효림	1	0.84	1	1	0
26	자연초지	0	0.82	0.118	1	0
27	골프장	0.65	0.82	1	1	0
28	묘지	0	0.82	0.118	1	0
29	기타 초지	0	0.82	0.118	1	0
30	내륙습지	0	0.68	0.125	1	0
31	갯벌	0	0.68	0.125	0	0
32	염전	0	0.68	0.125	0	0
33	해변	0	0.64	0.132	0	0
34	강기슭	0.2	0.64	1	0	0
35	암벽바위	0	0.64	0.132	0	0
36	채광지역	0.2	0.64	1	0	0
37	운동장	0.2	0.64	1	0	0
38	기타 나지	0	0.64	0.132	0	0
39	하천	0	0.16	0.093	0	0
40	호소	0	0.16	0.093	0	0
41	해양수	1	0	0	0	0
990	NoData	0	0	0	0	0

표를 포함하여 기준기온 및 도시열섬효과, 공기혼합거리, 최대냉각거리, 습도, 녹지공간과 건물밀도 값 등이 있다(표 3). 이중 습도와 기준기온의 경우 전체 HMI에 영향을 미치지 않고, 특정 시간대의 실제 온도 분포도 작성에 이용되는 것으로 나타났다. 그러나 이 값을 입력하지 않으면 도시냉각모형이 작동하지 않아 본 연구에서는 연구 지역과 가장 가까운 서울기상청의 2022년 8월 평균 온도 및 습도 값을 입력하였다(기상청 기상자료 개방 포털). 도시열섬효과와 크기를 나타내는 Surface UHI(Urban Heat Island) 지수는 Yale 대학에서 제공하는 여름철 낮 시간대 Surface UHI intensity 값을 사용하였다(Global Surface UHI Explorer). 공기혼합거리는 InVEST 매뉴얼에서 기본값으로 사용하는 1,000 m을 입력하였으며, 최대 냉각거리는 50m 간격으로 HMI를 산출하였다

(그림 3). 녹지공간과 건물밀도 값은 Natural Capital Project에서 제공하는 InVEST 도시냉각모형 사용자 설명서에 따라 입력하였다.

### 3) 주·야간 지표온도(LST) 산출

주간 LST 산출을 위해 USGS의 LANDSAT 8 Data Users Handbook(USGS, 2019)을 적용였다. 열적외선 밴드에 해당하는 10번 band의 DN값을 분광복사량(TOA) 값으로 변환시킨 후, 밝기온도(brightness temperature, BT)를 계산하였다. 이후 방사를 보정을 위해 정규식생분포지수(NDVI) 기반으로 한 방사율추출방법을 적용하였다(Avdan and Jovanovska, 2016).

본 연구에 사용된 영상은 2022년 9월 9일 11시 11분(한국시간 기준)에 촬영된 Landsat 8 OLI/TIRS 영상으로,

표 3. 도시냉각모형 구동 시 요구되는 사용자 입력 값과 그 내용

입력 자료	자료의 내용	입력 자료	자료의 내용
생물리적 표	분석 대상 지역 값 입력	공기혼합거리(m)	매뉴얼 지정 값
기준기온	기상청 자료	최대냉각거리(m)	사용자 지정
습도(%)	사용자 지정	녹지공간	매뉴얼 지정 값
도시열섬효과	관측 자료를 통해 산출	건물밀도	매뉴얼 지정 값

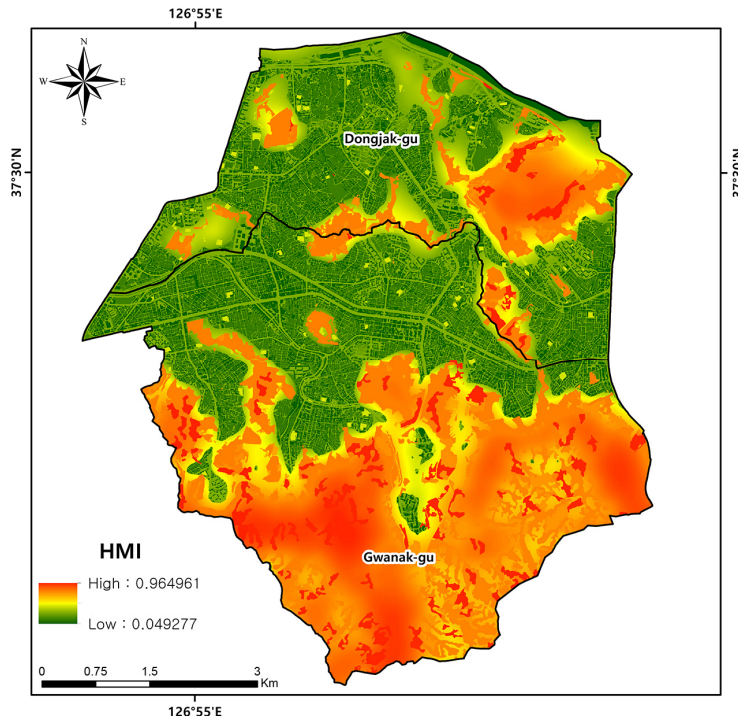


그림 3. InVEST Urban Cooling Model 구동 결과 얻어진 HMI 분포지도(냉각효과 거리 150m 설정시 산출된 지도)

LANDSAT 8 Data Users Handbook(2019) 공식을 이용하여 분석하였다. 그 결과, 기존 Landsat 8을 이용한 LST 작성 연구보다 그 값이 매우 크게 나타났다(그림 4). 지준범 등(2016)과 이종신과 오명관(2019)은 Landsat 8을 이용하여 LST를 산출할 경우 여름철에는 실제보다 높게, 겨울철에는 실제보다 낮게 나타나는 경향이 있어서, 다양한 방법을 통해 보정 하여 사용해야 실제 측정값과 유사한 값을 얻을 수 있다고 언급하고 있다. 그러나 본 연구에서는 실제 온도 값이 아닌 위성에서 얻어진 LST의 최대 및 최소값의 분포 경향을 살펴보기 때문에, LANDSAT 8 Data Users Handbook(USGS, 2019)의 계산식을 통해 산출된 주간 LST를 변환 없이 사용하였다.

야간 지표온도는 NASA의 Earthdata 사이트를 통해 2022년 8월 23일 21시 24분(한국시간)에 획득된 ASTER L2 surface temperature 자료를 이용하여 작성하였다(그림 5). ASTER L2는 지구 표면온도와 토양 및 식물의 건조, 탄소함량 등을 측정하는 위성영상으로 기후변화, 환경변화, 자연재해 및 도시계획 등에 다양한 공간정보를 제공하고 있다(Abrams and Ramachandran, 2002; Kato *et al.*, 2006; Hulley and Hook, 2009). 특히 Nichol(2005)

는 주·야간 도시열섬에 대한 녹지효과를 ASTER L2 영상을 사용하여 미국 주요 도시인 뉴욕, 로스앤젤레스, 시카고, 휴스턴을 분석하였으며, 4개 도시 모두 식생피복에 따른 야간 열섬 완화효과가 유의미하다는 것을 확인하였다. 그 밖에도 영상을 통해 야간 도시열섬에 기상이나 계절, 녹지 등의 요인이 영향을 주는 것으로 나타났다(Zhou *et al.*, 2010; Lai *et al.*, 2021).

### III. 연구 결과 및 논의

#### 1. InVEST 도시생각모형과 주·야간 LST의 관계

InVEST 도시생각모형을 통해 얻어진 HMI 유효성 검증하기 위해 Landsat 8 및 ASTER L2를 통해 작성된 주·야간 LST와의 관계를 검토하였다. 검증은 Arcmap의 Create Accuracy Assessment Points Tool을 통해 연구지역의 토지피복 면적에 비례하여 임의의 점을 추출하였다. 생성되는 임의의 점은 토지피복 별 최소 10개 이상

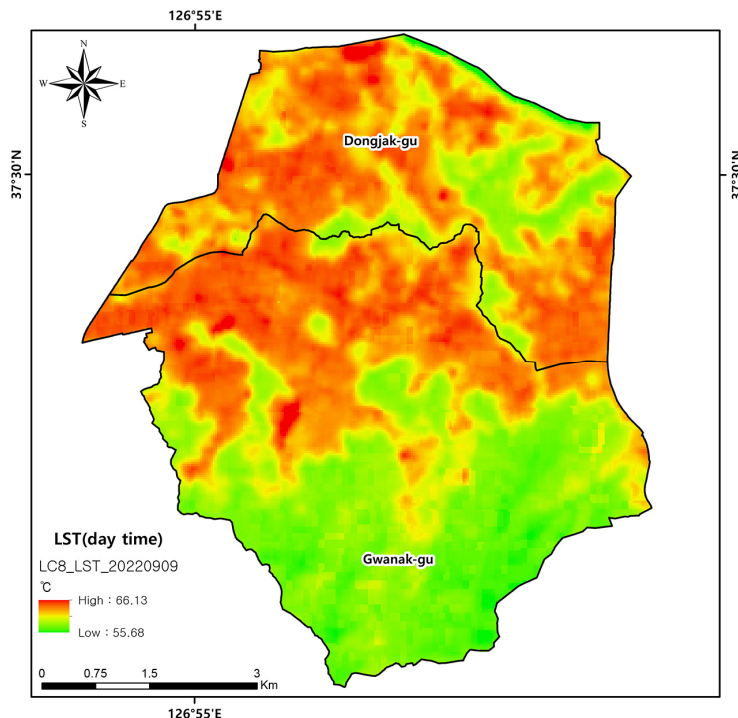


그림 4. Landsat 8 OLI/TIRS 이용하여 작성한 주간 LST(2022.9.9.) 분포



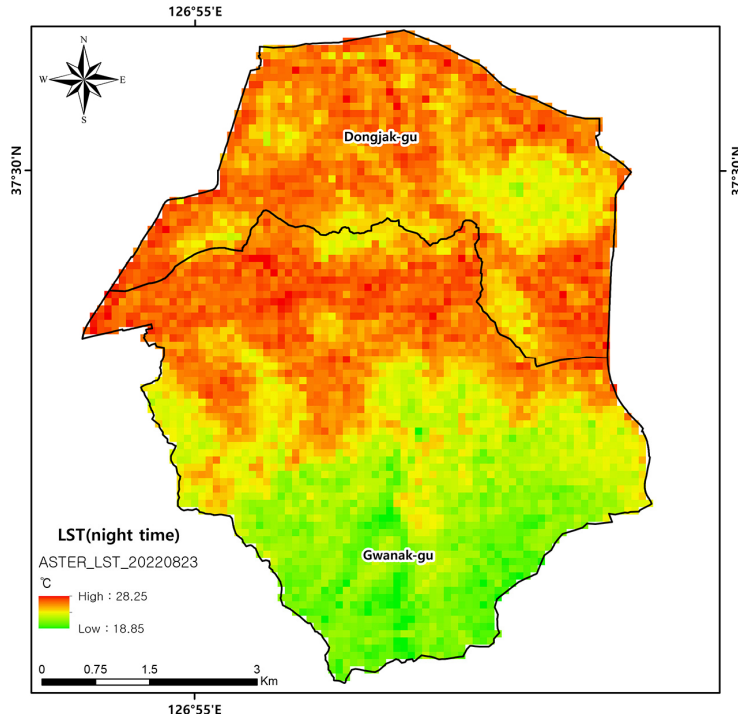


그림 5. ASTER L2 surface temperature 자료를 이용하여 작성한 야간 LST(2022.8.23.) 분포

으로 설정하였으며, 전체 검증 지점은 총 2,974 개였으며, 가장 많은 토지피복 검증 지점은 활엽수림으로 619 개였다.

그림 6은 50 m 간격의 최대냉각거리 값을 통해 산출된 HMI와 주간 LST와의 상관관계를 보여주고 있다. 최대냉각거리 250 m에서 LST와 HMI 상관관계가 가장 높았으며, 최대냉각거리가 멀어질수록 상관성이 낮아지는 경향을 보였다. 즉 이것은 본 연구 지역에서 주간에 녹지에 의한 최대냉각거리의 임계 값은 250 m로, 그 이후 녹지 냉각 효과는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향성은 그림 8을 통해 다시 확인할 수 있다.

그림 7은 50 m 간격의 최대냉각거리 값을 통해 산출된 HMI와 야간 LST와의 상관관계를 보여주고 있다. 최대냉각거리가 350 m 부근에서 HMI와 LST의 상관관계를 나타내는 R<sup>2</sup> 값이 정점을 찍은 후 최대냉각거리 값이 증가할수록 상관관계가 점차 낮아진다. 즉 이것은 본 연구 지역에서 야간의 녹지에 의한 최대냉각거리 임계값은 350 m이며, 그 이상이 되면 녹지 냉각효과는 감소하고 있다. 이러한 경향성은 그림 8을 통해 다시 확인할 수 있다.

## 2. InVEST 도시냉각모형의 주·야간 냉각 효과 거리

그림 6과 7의 주간 및 야간 LST의 2차 함수곡선을 비교해보면, 야간 LST는 낮은 구간(19~22°C)에서는 HMI 값의 변화가 적다가 온도가 올라갈수록 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. 주간 LST의 함수곡선이 거의 직선임을 고려할 때, 초기 낮은 구간에서 두 LST 값의 차이가 나는 특징을 보인다. 이는 야간 LST의 19~22°C 사이에서 HMI가 영향을 받지 않는 것으로 해석할 수 있다. 해당 구간은 산림(관악산, 국사봉, 까치고개)이나 도시 녹지(국립현충원), 수체(한강) 지역으로, HMI의 변화량이 적은 것으로 나타났다. 그 외 지역은 주간과 야간이 같은 패턴을 나타낸다.

건물이나 도로는 태양복사열을 잘 흡수하고 방출하는 성질을 가지고 있어서, 주간에는 열섬현상을 악화시키지만, 산림, 도시녹지, 수체는 지표면 온도와 열용량을 낮추는 역할을 해서 주간에 태양 복사열을 흡수한다. 따라서 야간 도시열섬은 이러한 녹지 및 수체보다 건물이나 도로와 같은 불투수층의 발열 효과들이 상대적으로



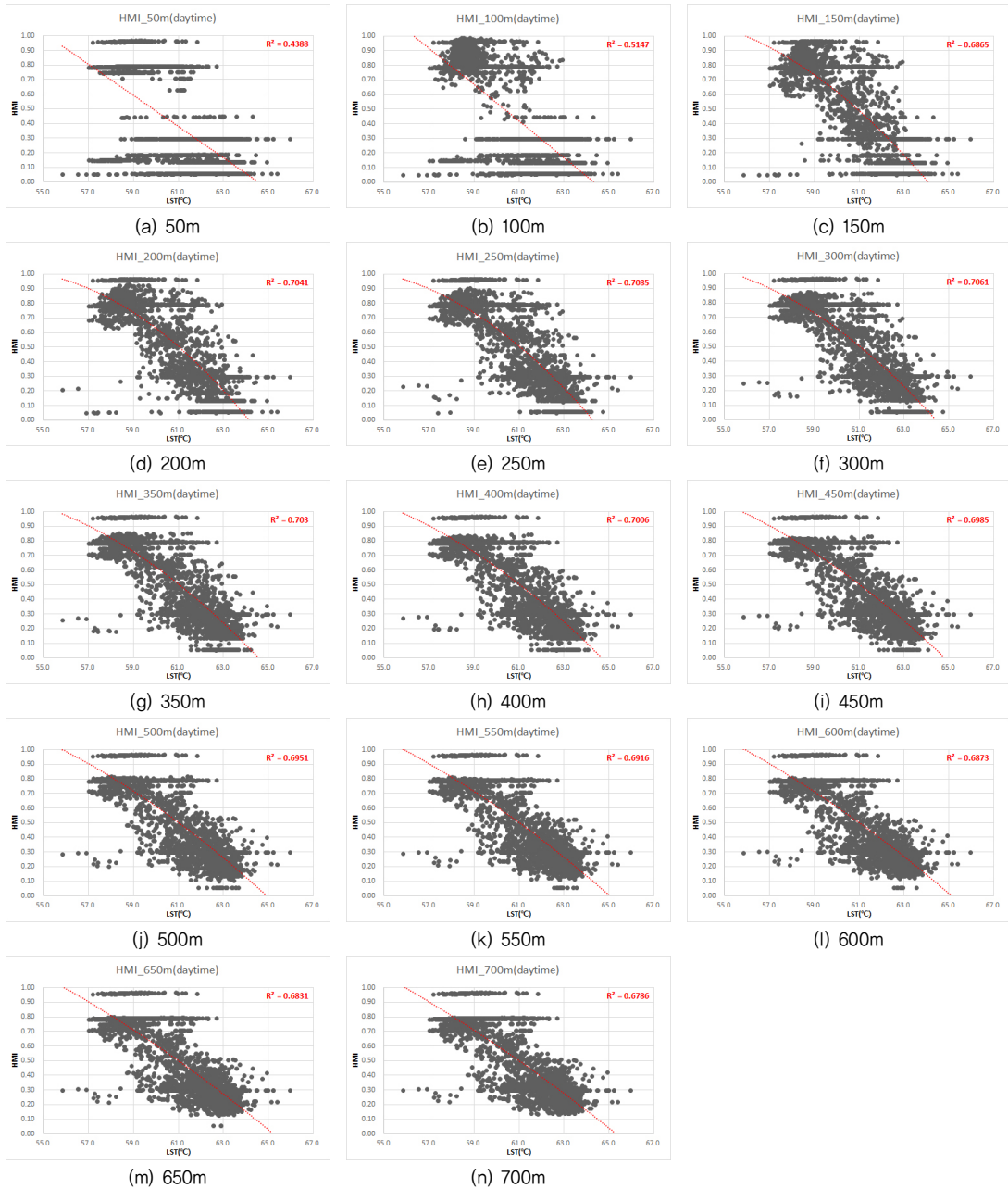


그림 6. 50m 간격의 최대냉각거리 값을 통해 산출된 HMI와 주간 LST와의 상관관계

두드러지는 현상이 나타나는 것으로 보인다.

그림 8에서도 100m 구간까지 야간 R<sup>2</sup>는 0.5 미만으로, 상관성이 주간과 비교하면 매우 낮은 것으로 나타난다. 이는 앞서 해석한 것과 같이 야간의 녹지 거리효과가 주간 거리효과에 비해 효과가 제한적인 것으로 해석할

수 있다.

따라서, 주간 열섬 완화효과를 증진하기 위해서는 넓은 녹지조성이 유리한 전략이기는 하지만, 야간은 넓은 녹지조성보다는 옥상이나 벽면녹화, 가로수 식재와 같이 건물이나 도로에서 태양 복사열이 덜 저장되도록 하



그림 7. 50m 간격의 최대냉각거리 값을 통해 산출된 HMI와 야간 LST와의 상관관계

는 전략이 효과적인 것으로 보인다. 이러한 결과는 녹지의 열섬 완화효과가 주로 증발산에 의해 발생하며, 증발산은 일사량과 토양수분에 의존적이기 때문이다. 주간에는 일사량이 많고 토양수분도 충분한 넓은 녹지에서 증발산이 활발하게 일어나 열섬 완화효과가 크게 나타

나지만, 야간에는 일사량이 없고 토양수분도 감소하여 증발산이 줄어들고 열섬 완화효과가 감소한다. 따라서, 건물이나 도로의 표면을 녹화하여 태양복사열의 흡수를 줄이거나, 가로수를 식재하여 태양복사열의 방출을 증가시키는 것은 야간의 열섬 완화효과에 기여할 수 있다.

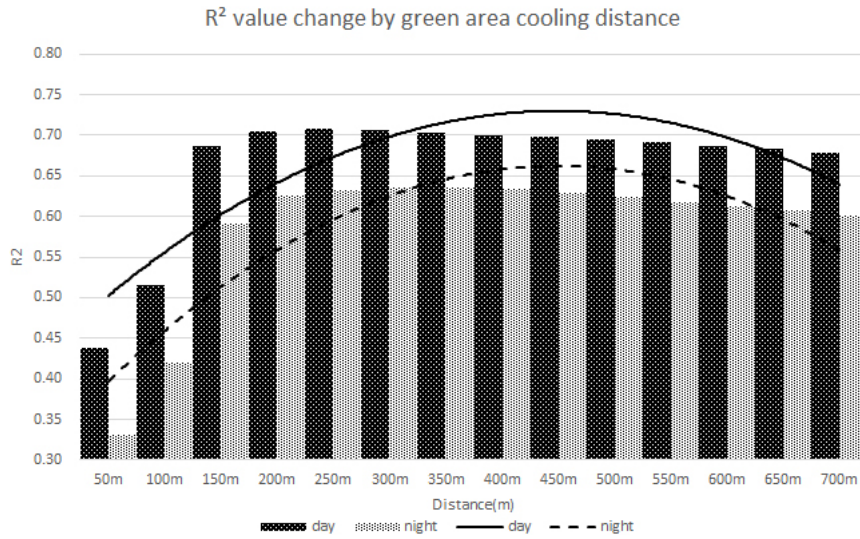


그림 9. 주·야간 LST와 최대냉각거리 거리별 R²의 변화

#### IV. 토의 및 결론

도시열섬 연구의 대부분이 주간 LST를 이용하여 분석한 것에 비해, 본 연구에서는 주·야간 LST 자료를 이용하여 주로 야간에 발생하는 도시열섬 현상의 특성을 HMI를 통해 해석해 보고 이에 따른 한계를 기술하고자 하였다.

본 연구는 InVEST 도시냉각모형에서 얻어진 열 완화지수 결과를 원격탐사 자료의 주·야간 LST와의 비교를 통해 상관성을 분석하였다. 그 결과, 주간의 냉각효과 최대거리는 250m, 야간의 냉각 효과 최대거리는 350m로 평가되었으며, 이를 통해 주간과 야간에서의 냉각 효과에 대한 차이를 확인할 수 있었다.

그러나, 녹지의 주·야간 냉각 효과 최대거리의 R²의 정점이 100m에서 150m 구간으로 넘어갈 때 변화가 크고, 그 이후 구간에서는 변화량이 미비하다. 특히, 야간의 100m 구간까지 R²가 0.42를 넘지 못하고 주간에 비해서도 설명력이 떨어지는 것으로 볼 때, 야간의 냉각 거리 효과는 유의미하지 않다고 볼 수 있다. 이는 그림 7 Green Area Cooling Distance 그래프에서 온도변화(19~22°C)와 HMI의 변화량 곡선을 통해서도 확인할 수 있었다.

Anand and Sailor(2023)는 녹지와 수체가 주간에는 도시열섬 완화에 영향을 주지만 야간 열섬 완화에는 영향이 적다고 기술하며, 옥상정원이나 건물의 재료를 통해 주변 온도를 1°C 정도 줄일 수 있다고 언급하고 있다.

이 밖에도 야간의 열섬 완화로서 도시의 습도(Ibsen et al., 2021), 옥상녹화(Sharma et al., 2016; Anand and Sailor, 2023), 바람(He et al., 2022) 등이 영향을 주는 것으로 나타나고 있다.

도시열섬 현상은 야간에 더 두드러지게 나타나기 때문에, 야간 도시열섬 완화에 대한 도시설계 및 계획 전략을 수립할 필요가 있다. 주간과 비교해 야간은 식물이나 토양수분에 대한 증발산이 줄어들어 식생에 따른 도시열섬 완화효과가 제한적이므로(Oke, 1982), 넓은 녹지를 조성하기보다는 옥상정원이나 건물 재료를 통해 건물이 흡수하고 방출하는 열을 최소화하는 방안을 제시할 수 있다. 또한 연못이나 인공호수, 하천 등을 조성하여 공기 중 온도를 흡수하는 방안이나 도시의 공간구조를 통해 바람길을 확보하여 공기를 순환하는 방안도 제안할 수 있다.

본 연구 결과를 통해 대기 중 온도는 지형이나 고도의 영향을 받기 때문에, InVEST 도시냉각모형의 적용 범위를 도심지와 주변 산림 고도차가 낮은 지역으로 제한적으로 적용해야 할 것으로 보인다. 또한, 위성 열영상 자료와 토지피복도의 공간해상도 차이가 있어 상세한 분석에 한계가 있었다. 추후 연구는 주변 산림의 고도차가 적은 도심을 대상으로, 무인항공기 열화상 센서를 활용하여 고해상도 영상을 촬영한 후, InVEST 도시냉각모형과 비교를 통해 본 모형의 유용성을 검토하고자 한다.

## 참고문헌

- 관악구, 2023, 제 37회 2022 관악통계연보.
- 권혁수·김장수, 2022, 도시녹지의 지표 냉각 능력 평가를 위한 InVEST Urban Cooling Model의 적용, 한국지리학회지, 11(4), 449-463.
- 김건형·강영은·손승우·김동우·유재진, 2020, “UAV 기반 도시 열환경 분석을 통한 폭염 대응형 공간 전략 부산시 영도구 도시재생사업을 대상으로, 한국지리학회지, 9(1), 191-203.
- 김근한·김동범·송영명·최희선, 2021, “도시지역에서의 토지 피복 유형별 지표면 온도 현황 분석” 한국지리학회지, 10(3), 415-430.
- 김근화·이영곤·김재환·최희욱·김백조, 2018, “Landsat 8 위성자료를 이용한 도심녹지 냉각효과 분석” 대한원격탐사학회지, 34(2), 167-179.
- 김동우·유재진·윤정호·손승우, 2019, “UAV 열적외 카메라를 활용한 폭염 시 시가지의 표면온도 변화 분석” 한국지리학회지, 8(1), 47-60.
- 김미경·김상필·김남훈·손흥규, 2014, “LANDSAT 영상을 이용한 세종특별자치시의 도시화와 열섬현상 분석” 대한토목학회논문집, 34(4), 1033-1041.
- 김병찬·강재우·박찬·김현진, 2020, “심층신경망 모형을 이용한 서울시 도시공원 및 녹지공간의 열섬저감효과 분석” 한국조경학회지, 48(4), 19-28.
- 김태현·이원희·한유경, 2018, “Landsat-8 시계열 위성영상을 활용한 도심지 확장에 따른 열섬포텐셜 분석” 한국측량학회지, 36(4), 305-316.
- 동작구, 2023, 제 37회 2022 동작통계연보.
- 박은빈·한경수·이창석·피경진, 2012, “MODIS 16-Day Albedo 자료를 이용한 동북아시아 지역의 토지피복별 알베도 변화 분석” 대한원격탐사학회지, 28(5), 501-508.
- 박종화·조기혁, 2016, “공원 크기에 따른 공원의 온도저감 효과 분석 : 일산 신도시를 대상으로” 대한국토계획학회지, 51(5), 216-228.
- 송봉근·박경훈, 2015, “도시열섬완화를 위한 토지 이용 유형별 합리적 녹지율 분석” 한국지리정보학회지, 18(2), 59-74.
- 송철호·이우균·최현아·전성우·김재욱·김준순·김정택, 2015, “산림의 수자원 공급 생태계서비스 평가를 위한 InVEST Water Yield 모형의 적용” 한국지리정보학회지, 18(1), 120-134.
- 양병선·허한결, 2021, 도시 공원녹지 공간의 특징에 따른 열섬저감 효과 분석, 휴양및경관연구, 15(3), 13-19.
- 오규식·홍재주, 2005, “도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구” 한국도시설계학회지, 6(1), 47-64.
- 윤기학, 2012, 열섬현상 완화를 위한 주거지 모델 개발에 관한 연구. 중앙대학교 석사학위논문.
- 이용관·정지훈·장원진·김진욱·김성준, 2022, “VIIRS와 MODIS 자료를 활용한 중분류 토지이용별 알베도 분석: 대한원격탐사학회지, 38(1), 1385-1394.
- 이종산·오명관, 2019, “Landsat 8 위성영상과 AWS 데이터를 이용한 서울특별시의 지표면 온도 분포 분석” 한국산학기술학회논문지, 20(1), 434-439.
- 조현길·안태원, 2006, “도시 수목식재와 미기후 개선의 상관성 구명” 한국조경학회지, 34(5), 70-75.
- 지준범·김부요·조일상·이규태·최영준, 2016, “고해상도 Landsat 8 위성자료기반의 지표면 온도 산출” 대한원격탐사학회지, 32(2), 171-183.
- Abrams, M., Hook, S., and Ramachandran, B., 2002, ASTER user handbook version 2, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- Anand, J. and Sailor, D.J., 2023, How can we combine urban cooling strategies to effectively cool cities over the entire diurnal cycle?, *Building and Environment*, 110524.
- Avdan, U. and Jovanovska, G., 2016, Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data, *Journal of Sensors*, Vol 2016, Article ID 1480307, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Chen, J., Chu, R., Wang, H., Zhang, L., Chen, X., and Du, Y., 2019, Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement, *Journal of cleaner production*, 237, 117722.
- Hamada, S., Tanaka, T., and Ohta, T., 2013, Impacts of land use and topography on the cooling effect of green areas on surrounding urban areas, *Urban forestry & urban greening*, 12(4), 426-434.
- He, Y., Yuan, C., Ren, C., Wang, W., Shi, Y., and Ng, E., 2022, Urban ventilation assessment with improved

- vertical wind profile in high-density cities-Investigations in nighttime extreme heat, *Building and Environment*, 216, 109018.
- Hulley, G.C. and Hook, S.J., 2009, The North American ASTER land surface emissivity database (NAALSED) version 2.0, *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1967-1975.
- Ibsen, P.C., Borowy, D., Dell, T., Greydanus, H., Gupta, N., Hondula, D.M., and Jenerette, G.D., 2021, Greater aridity increases the magnitude of urban nighttime vegetation-derived air cooling, *Environmental Research Letters*, 16(3), 034011.
- Kato, S., Yamaguchi, Y., and Tsuji, K., 2006, ASTER land surface reflectance product: Algorithm development and preliminary validation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), 1741-1750.
- Lai, J., Zhan, W., Voogt, J., Quan, J., Huang, F., Zhou, J., and Lee, X., 2021, Meteorological controls on daily variations of nighttime surface urban heat islands, *Remote Sensing of Environment*, 253, 112198.
- Nichol, J., 2005, Remote sensing of urban heat islands by day and night, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(5), 613-621.
- Oke, T.R., 1982, The energetic basis of the urban heat island, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 108, 1-24.
- Oliveira, S., Andrade, H., and Vaz, T., 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(11), 2186-2194.
- Sharma, A., Conry, P., Fernando, H.J.S., Hamlet, A.F., Hellmann, J.J., and Chen, F., 2016, Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model, *Environmental Research Letters*, 11(6), 064004.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., and 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.
- USGS, 2019, Landsat 8(L8) Data Users Handbook, Version 5.0, Sioux Falls, South Dakota.
- Zawadzka, J.E., Harris, J.A., and Corstanje, R., 2021, Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data, *Landscape and Urban Planning*, 214, 104163.
- Zhang, Y., Murray, A.T., and Turner Li, B.L., 2017, Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona, *Landscape and Urban Planning*, 165, 162-171.
- Zhou, J., Chen, Y., Wang, J., and Zhan, W., 2010, Maximum nighttime urban heat island (UHI) intensity simulation by integrating remotely sensed data and meteorological observations, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(1), 138-146.
- 기상청, 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/>
- 환경부, 환경공간정보서비스, <https://egis.me.go.kr/>
- CGIAR-CSI (Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information), <https://csidotinfo.wordpress.com/>
- Global Surface UHI Explorer, <https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap>
- Natural Capital Project, <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/>
- 교신 : 김장수, 32588, 충남 공주시 공주대학교로 56, 공주대학교 지역개발연구소(이메일: matra99@kongju.ac.kr)
- Correspondence: Jangsoo Kim, 32588, 56 Gongju-daehak-ro, Gongju-si, Chungcheongnam-do, Korea, Institute of Regional Development Research, Kongju National University (Email: matra99@kongju.ac.kr)
- 투고접수일: 2023년 11월 6일  
 심사완료일: 2023년 12월 4일  
 게재확정일: 2023년 12월 21일