

도시녹지의 지표 냉각 능력 평가를 위한 InVEST Urban Cooling Model의 적용*

권혁수** · 김장수***

Application of InVEST Urban Cooling Model to Evaluate Surface Cooling Capacity of Urban Green Areas*

Hyuksoo Kwon** · Jangsoo Kim***

요약 : 본 연구에서는 InVEST Urban Cooling Model을 이용하여 도시녹지의 열 완화 가능 거리를 도출하고자 하였다. 연구지역은 녹지에 의한 냉각 효과가 국외 사례에 비해 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 기본적으로 본 연구에 사용된 연구지역의 도심지가 산지 사이의 좁은 골짜기를 따라 위치하고, 도시 내에서 비교적 면적이 큰 녹지(> 2ha)라 하더라도 주변 도심보다 고도가 높은 구릉성 산지로 구성되어 있기 때문으로 판단된다. 따라서, InVEST Urban Cooling Model을 이용한 도시녹지의 열 완화 능력을 살펴보기 위해서는 본 모델의 적용 범위를 도심지와 주변 산지와 고도차가 크지 않은 지역이나, 비교적 넓은 평지에 위치한 도심지에 대해 제한적으로 적용시켜야 할 것으로 판단된다.

주요어 : InVEST 도시 냉각 모델, 열 완화 지수, 지표 온도, 냉각 가능 거리, 도시 녹지

Abstract : In this study, the thermal mitigation distance of urban green areas was tried to be derived using the InVEST Urban Cooling Model. In the study area, it was confirmed that the cooling effect by green areas was larger than in foreign cases. The difference is that the downtown area of the study area used in this study is basically located along a narrow valley between the mountains. In addition, it is judged that this is because even if the area is relatively large within the city (> 2 ha), it is composed of hilly mountainous areas with a higher elevation than the surrounding downtown area. Therefore, in order to examine the thermal mitigation capacity of urban green areas using the InVEST Urban Cooling Model, it should be applied limitedly to areas where the elevation difference between the downtown area and surrounding mountainous areas is not high or to downtown areas located on relatively wide flat land.

Key Words : InVEST Urban Cooling Model, Heat Mitigation Index (HMI), Land Surface Temperature (LST), Green area cooling distance, Urban green area

*이 논문은 국립생태원의 고유과제로 수행된 ‘지역의 생태가치 평가 및 인식증진 방안’ 연구 사업(NIE-고유연구-2022-07) 및 ‘핵심 생태자산과 생태계서비스 가치평가 및 보전방안’ 연구 사업(NIE-고유연구-2022-03)의 지원을 받아 수행된 연구임.

**국립생태원 생태연구본부 선임연구원(Senior Researcher, Bureau of Ecological Research, 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

현대의 도시 확장은 과거 촌락에서의 주거환경과 크게 다른 양상을 보여준다. 넓고 넉넉한 공간에 많지 않은 사람들이 여유롭게 생활하는 촌락에 비해 많은 사람들이 상대적으로 비좁은 지역에서 거주하는 도시(권용우 등, 2001:3)는 과거 촌락에 비해 열의 집중도가 높은 편이다. 최근 기후변화에 따른 폭염일수의 증가는 도시 내 열 스트레스를 증가시켜 도시민의 건강과 업무효율에 크게 영향을 주고 있다. 도심 내 녹지공간은 식생을 통해 그늘을 제공하고 도시 구조의 열 특성을 개선하며, 증발산을 통해 열 냉각을 증가시켜 도시 열 압력을 줄이는 데 도움을 주고 있다.

이처럼, 녹지 공간을 통한 도시 열 완화는 사망률 및 질병발생률 감소, 쾌적함과 노동생산성 증가, 에어컨의 사용 감소를 통해 도시민의 건강과 삶의 질에 영향을 미친다. 따라서, 도시 내 열 완화를 위한 도시 계획과 실행에 열 완화에 도움을 주는 도시 녹지 공간의 열 완화 용량을 정확하게 정량화하는 것이 필요하다(Zawadzka *et al.*, 2021).

도시 녹지 공간과 온도 분포와의 관계를 분석하기 위한 연구가 여러 연구자들에 의해 이루어졌다. 송봉근·박경훈(2015)은 Terra 위성의 주간 및 야간에 촬영된 다중시기 ASTER TIR(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Thermal infrared) 영상의 지표 온도를 이용하여 토지이용 유형별 도시 열섬 완화 효과를 분석하였다. 그들은 이 연구에서 야간시간보다는 주간 시간에 단독주택지의 녹지율에 따른 지표온도 저감 효과가 가장 뚜렷하게 나타났다고 밝히며, 도시 열섬 완화를 위한 합리적인 녹지율은 40~50% 정도가 적당하고 주장하였다. 고영주·조기환(2020)은 Landsat 8을 이용하여 전주시의 지표 온도(Land Surface Temperature, 이하 LST) 핫스팟 지역을 분석하면서, 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, 이하 NDVI)가 LST를 낮추는 요인으로 작용하고 있다고 하였다. 김근한 등(2021)은 서울시를 대상으로 토지피복과 지표면 온도와의 관계를 살펴보면 10,000m² 이상의 크기를 가진 객체들을 기준으로 정규 식생 지수가 높게 나타나는 지역 인근의 토지피복 객체들에서 지표면 온도가 낮게 나타나는 경향이 있다고 밝혔다.

무인항공기를 이용한 도시 내 토지피복별 온도 분포의 경향에 대한 연구도 진행이 되고 있는데, 김동우 등

(2019)은 폭염 경보가 발령된 여름철 오전과 정오, 오후에 각각 무인항공기를 이용하여 도시 내 토지피복별 지표 온도의 변화를 분석하였다. 연구결과 그들은 토지피복과 그림자가 지표 온도에 영향을 미친다고 밝히고 있다. 김건형 등(2020)은 무인항공기를 이용하여 도시 내 토지피복 유형별 표면 온도를 측정하여 지도화 하였다. 그들은 주거 환경이 열악한 도시재생사업 대상지에 위자료를 이용함으로써 도시재생계획 단계에서부터 도시 내 열 완화 계획이 포함될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

도시 내 열 완화를 위해서는 도시 계획 단계에서 사용하기 어려운 데이터 분석 기술이 요구되고 있다. 이러한 한계를 해결하기 위해 미국 Stanford 대학에서 자연 자본 프로젝트(Natural Capital Project)를 통해 토지피복 자료와 쉽게 접근할 수 있는 몇 가지 매개변수를 사용하여 열 완화 지수(Heat Mitigation Index, 이하 HMI)를 산출하는 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) Urban Cooling Model을 제작하였다(<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/>).

InVEST의 도시 냉각 모델(Urban Cooling Model)은 식생의 증발산량, 대규모 도시 공원의 냉각 거리 및 토지 피복도에 할당된 알베도를 기반으로 HMI를 계산한 다음 대기 온도에 대한 평균 냉각 용량 및 식생 냉각과 관련된 가치를 추정하고, 후속 평가의(예, 건물의 에너지 사용 저감) 정확성을 결정하는 모델이다(Zawadzka *et al.*, 2021).

이 연구의 최종적 목표는 InVEST Urban Cooling Model(ver. 3.9.1)에 의해 출력된 HMI의 유효성을 여름철 위성영상으로부터 획득된 LST와의 상관관계를 통해 검증하는 것이다. 이를 위해 낮은 열 완화 지수 값이 LST의 최고 온도에 해당해야 한다(반대로 높은 HMI 값은 LST의 낮은 온도에 대응)는 가정하에 InVEST Urban Cooling Model에 의해 생성된 HMI가 도시 녹지의 냉각 용량 평가에서 LST 대신 사용할 수 있다고 가정하였다.

II. 연구지역 및 연구방법

1. 연구지역

연구지역은 서울시 주변의 경기도 8개 시군으로 가평군, 고양시, 구리시, 동두천시, 양주시, 의정부시, 포천시, 하남시를 포함하고 있다(그림 1). 이 지역들은 서울

의 배후도시 역할을 하는 지역으로 고양시와 구리시, 의정부시, 하남시는 비교적 평탄했던 과거 경작지를 중심으로 도시화가 진행되었으며, 가평군과 동추천시, 양주시, 포천시는 앞 도시들에 비해 산지의 비중이 높은 지역으로 곡지 및 소하천 주변 평지의 경우 많은 지역에서 도시화가 진행되어 있다.

2. 연구자료 및 연구방법

1) 토지피복

InVEST Urban Cooling Model 구동을 위해 사용된 토지피복도는 환경부에서 2020년도에 발행된 세분류 토지피복도(환경공간정보서비스), 연구지역은 총 35종류의 토지피복 분류가 존재하며, 가장 넓은 면적을 차지하는 것은 ‘활엽수림’으로 1,006.21km²로 전체 면적의 약 39.5%를 차지하고 있다. 반면에 가장 작은 면적을 차지하는 것은 ‘혼합지역’¹⁾으로 면적은 0.09km²로 전체 면적의 약 0.004%를 차지하고 있다(표 1). 연구지역이 경기

도 북서부 8개 시군을 대상으로 하고 있어 전체 토지피복 중 산림지가 큰 비중을 차지하고 있는 것이 특징이다.

2) InVEST Urban Cooling Model

InVEST Urban Cooling Model은 도시의 경계를 넘어 확장되는 규모가 큰 도시 녹지의 냉각 용량을 고려하여 연구 지역에 있는 모든 토지피복에 대한 도시 녹지의 냉각 용량을 추정하는 HMI 지도를 생성한다.

Urban Cooling Model은 먼저 지역 그림자 지수, 증발산 및 알베도를 기반으로 각 픽셀(pixel)에 대한 냉각 용량(CC) 지수를 계산한다. 이 접근법은 Zardo *et al.*(2017)과 Kunapo *et al.*(2018)이 제안한 지수를 기반으로 한다. 이후 열 감소의 중요한 요소인 알베도(*albedo*)가 추가되었다. 그림자 지수(*shade*)는 각 토지이용/토지피복(LULC) 범주와 관련된 나무 수관(높이 2m 이상)의 비율을 나타내고 그 값은 0과 1 사이로 구성된다. 증발산 지수(Evapo-transpiration Index: *ETI*)는 잠재적 증발산, 즉 식생의 증발산(또는 초목이 없는 지역의 경우 토양에서 증발의

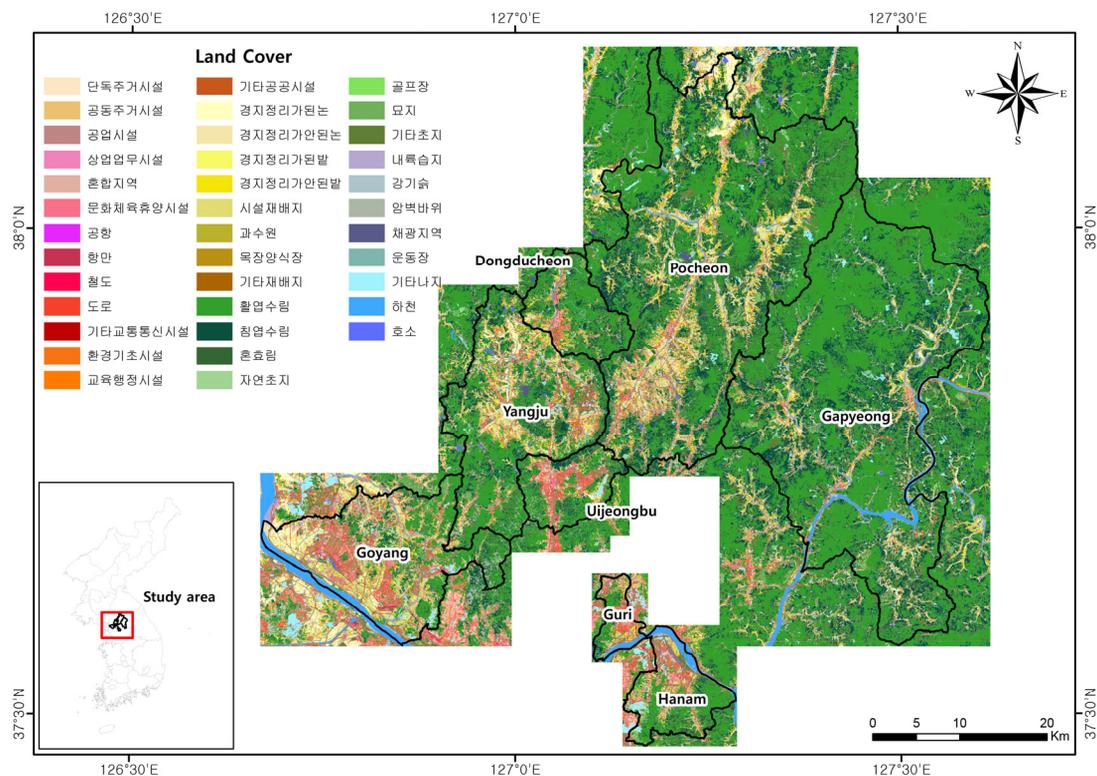


그림 1. 연구지역

표 1. 연구지역 내 토지피복별 분포 면적

토지피복(세분류)	면적(km ²)	토지피복(세분류)	면적(km ²)
단독주거시설	18.04	목장양식장	4.90
공동주거시설	8.22	기타재배지	9.27
공업시설	15.96	활엽수림	1,006.21
상업업무시설	28.75	침엽수림	401.95
혼합시설	0.09	혼효림	200.76
문화체육휴양시설	5.06	자연초지	13.28
철도	2.00	골프장	10.45
도로	144.89	묘지	26.38
기타교통통신시설	0.14	기타 초지	204.10
환경기초시설	0.69	내륙습지	21.70
교육행정시설	2.09	강기습	4.57
기타 공공시설	4.74	암벽바위	5.82
경지정리가된 논	26.93	채광지역	3.77
경지정리가 안 된 논	64.31	운동장	2.46
경지정리가 된 밭	4.91	기타 나지	89.26
경지정리가 안 된 밭	120.72	하천	51.63
시설재배지	28.90	호소	5.88
과수원	8.59		

정규화 된 값을 나타낸다. 기준 증발산량(ET0, 사용자가 제공)과 자르기 계수(Kc, 픽셀의 LULC 유형과 관련됨)를 곱하고 관심 영역의 증발산 지수에 있는 증발산 지수의 최대 값으로 나누어 각 픽셀에 대해 계산된다(식 (1)).

$$ETI = \frac{K_c * ET0}{ET_{max}} \quad (1)$$

Urban Cooling Model에서 냉각 용량(CC)은 그림자 지수(shade), 증발산 지수(ETI) 및 알베도(albedo)의 가중 합수로 계산된다(식 (2)). 이 방정식은 식생 지역에 충분한 물이 공급되고 있다고 가정하고 있으며, 냉각 용량 지수의 세 가지 요소의 권장 가중치는 경험적 데이터에 기반하여 부여되어 있다.

$$CC_i = 0.6 * shade + 0.2 * albedo + 0.2 * ETI \quad (2)$$

넓은 녹지 공간(> 2ha)의 주변 지역에 대한 냉각 효과를 설명하기 위해, 본 모델은 도시 녹지의 HMI를 계산한다(McDonald et al.(2016) 및 Zardo et al.(2017)의 논의 참조).

면적이 큰 녹지 공간의 영향을 받지 않는 경우 열 완화

(HMI)는 냉각용량(CC)과 같지만 그렇지 않은 경우 큰 녹지 공간과 관심 픽셀의 냉각 용량(CC) 값의 거리 가중 평균으로 설정된다.

이를 위해 모델은 먼저 각 픽셀(GA_i) 주변의 검색 거리 d_{cool} 내의 녹지 면적과 각 녹지 공간(CC_{park})에서 제공하는 냉각 용량을 계산한다.

$$GA_i = cell_{area} * \sum_{j \in d_{radius}} G_j \quad (3)$$

$$CC_{park_i} = \sum_{j \in d_{radius}} g_j * CC_j * e^{\frac{-d(i,j)}{d_{cool}}} \quad (4)$$

여기서 cell_{area}는 셀의 면적(ha), g_j는 픽셀 j가 녹지 공간이면 1, 그렇지 않으면 0, d(i, j)는 픽셀 i와 j 사이의 거리, d_{cool}는 녹지 공간의 냉각 효과 거리, CC_{park_i}는 녹지 공간에 기인하는 냉각 용량 값의 거리 가중 평균이다('녹지'로 인정되는 LULC 등급은 생물물리학 표에서 매개변수 'green_area'를 사용하여 사용자가 결정한다 표 2 참조). 다음으로 HMI는 다음과 같이 계산된다.

$$HM_i = \begin{cases} CC_i & \text{if } CC_i \geq CC_{park_i} \text{ or } GA_i < 2ha \\ CC_{park_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

최종적으로 InVEST Urban Cooling Model 구동을 위해 다음 그림 2와 같이 변수를 설정하였다.

입력된 토지피복도는 환경부에서 2020년에 발행된 Vector 형식의 세분류 토지피복도를 Raster 형식으로 변환하여 사용하였다. 기준 증발산 지수(ET0)는 송철호 등(2015)이 이용한 미국 몬태나주립대학교의 NTSG(Numerical Terradynamic Simulation Group)가 NASA Earth Observing System과의 파트너십을 통해 생산해 낸 MODIS 영상 기반 증발산량 자료(<http://www.ntsug.umt.edu/>)를 이용하였다. 해당 자료는 2011년 기준으로 MOD16 Global Evapotranspiration(ET)로써, 약 1km×1km의 공간해상도와 8일 간격의 시간해상도를 갖고 얻어진 자료를 월간 및 연간 사용이 가능하도록 수정하여 공개된 것이다.

Biophysical Table은 생물리적 값에 대한 표로, 각 정보와 토지피복 분류가 코드를 통해 연결된다. InVEST Urban Cooling Model에서는 각 토지피복에 대한 그림자 지수, 증발산 지수, 알베도, 녹지공간 판정, 건물 강도 등이 사용된다. 먼저 그림자 지수(shade)의 경우 미국 Stanford 대학의 Natural Capital Project Website에서 제공하는 샘플자료와 Zawadzka *et al.*(2021)의 연구에서 제시된 토지피복 및 식생의 높이에 따른 지수를 이용하여 분석에 이용된 토지피복별 지수를 재산정하여 입력하였다. 다음으로 증발산 지수(Kc)는 송철호 등(2015)이 작성한 우리나라 토지피복별 평균 증발산 지수를 사용하였다. 마지막으로 알베도(albedo)의 경우 국내 지역을 사례로 알베도를 작성한 김기열(2010)과 박은빈 등(2012), 송철호 등(2015)의 연구 결과를 바탕으로 본 연구의 연구지역과 유사한 환경하에 산출된 값을 취사선택하여 이용하였다. 녹지 공간 판정(Green area)과 건물

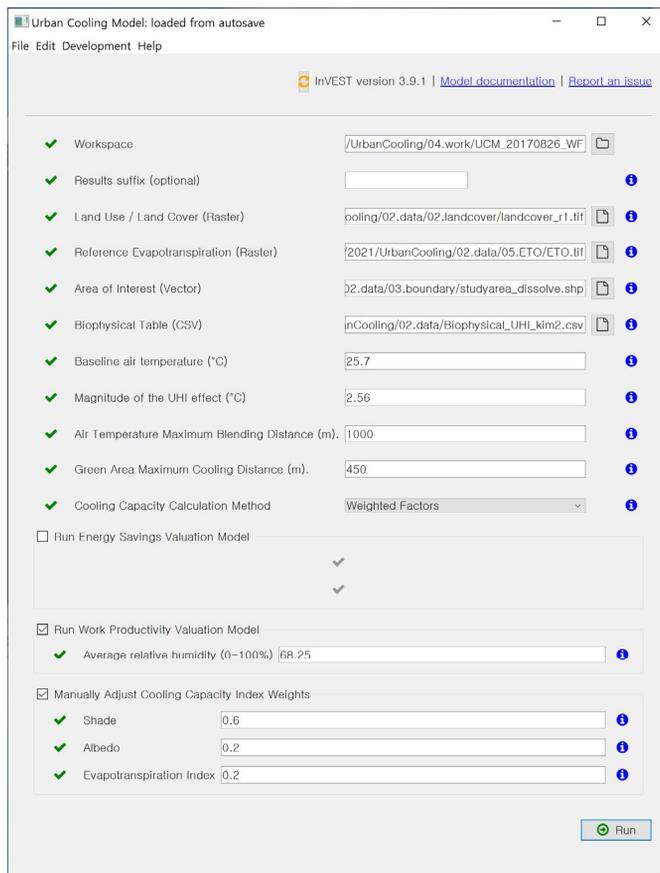


그림 2. InVEST Urban Cooling Model 실행을 위한 변수 설정

강도 값(Building intensity)은 Natural Capital Project Website의 InVEST Urban Cooling Model 사용자 설명서에 따라 입력하였다(표 2).

교외지역의 기온을 의미하는 'Baseline Air Temperature'의 경우 연구지역 반경 20km에 분포하는 종관기상

관측장비(AutomatedSynoptic Observing System, 이하 ASOS) 및 자동기상관측장비(Automated Weater Station, 이하 AWS) 자료 중 도시외곽의 평지에 위치한 파주지역(ASOS No. 99)의 2017년 8월 26일 오전 11시 기온을 사용하여 입력하였다(기상청 기상자료개방포털). 특정 일

표 2. Biophysical Table 입력 값

Code No.	Landcover	Shade	Kc	Albedo	Green area	Building intensity
1	단독주거시설	0.18	0.5	0.126	0	0.3
2	공동주거시설	0.05	0.5	0.126	0	0.95
3	공업시설	0.05	0.3	0.126	0	0.3
4	상업업무시설	0.05	0.3	0.126	0	0.3
5	혼합지역	0.3	0.3	0	0.3	0
6	문화체육휴양시설	0.18	0.3	0.126	0	0.3
7	공항	0.45	0.2	0.122	0	0.1
8	항만	0.45	0.2	0.122	0	0.1
9	철도	0.45	0.2	0.122	0	0.1
10	도로	0.45	0.2	0.122	0	0.1
11	기타 교통 통신시설	0.45	0.2	0.122	0	0.1
12	환경기초시설	0.05	0.3	0.126	0	0.3
13	교육행정시설	0.05	0.3	0.126	0	0.3
14	기타 공공시설	0.05	0.3	0.126	0	0.3
15	경지정리가된 논	0.65	0.65	1	0	0
16	경지정리가 안 된 논	0.65	0.65	1	0	0
17	경지정리가 된 밭	0.65	0.65	1	0	0
18	경지정리가 안 된 밭	0.65	0.65	1	0	0
19	시설재배지	1	0.7	0.133	1	0
20	과수원	0.7	0.7	1	0	0
21	목장양식장	0.85	0.85	1	0	0
22	기타재배지	1	0.85	0.133	1	0
23	활엽수림	1	1	0.095	1	0
24	침엽수림	1	1	0.095	1	0
25	혼효림	1	1	1	0	0
26	자연초지	0	0.65	0.118	1	0
27	골프장	0.65	0.65	1	0	0
28	묘지	0	0.65	0.118	1	0
29	기타 초지	0	0.65	0.118	1	0
30	내륙습지	0	1	0.125	1	0
31	갯벌	0	1	0.125	0	0
32	염전	0	1	0.125	0	0
33	해변	0	0.2	0.132	1	0
34	강기슭	0.2	0.2	1	0	0
35	암벽바위	0	0.2	0.132	1	0
36	채광지역	0.2	0.2	1	0	0
37	운동장	0.2	0.2	1	0	0
38	기타 나지	0	0.2	0.132	1	0
39	하천	0	1	0.093	0	0
40	호소	0	1	0.093	0	0
41	해양수	1	1	0	0	0
990	NoData	0	0	0	0	0

의 기온 자료를 이용한 이유는 InVEST Urban Cooling Model의 유효성을 검증하기 위한 검증자료인 위성영상의 획득일 및 시간과 일치시키기 위함이다. 다음으로 열섬효과의 크기를 나타내는 값은 Yale 대학에서 수행하여 제공하는(Global Surface UHI Explorer) 여름철 낮 시간대 본 연구지역에 해당하는 지역의 Surface UHI intensity 값을 차용하였다. 상대습도는 기온과 마찬가지로 2017년 8월 26일 오전 11시의 자료를 이용하였으나, 파주지역 자료가 아닌 연구지역 전체 자료의 평균을 이용하였다.

대기 중 기온이 섞이는 거리를 나타내는 'Air Temperature Maximum Blending Distance'와 냉각 효과에 영향을 미치는 가중치인 'Manually Adjust Cooling Capacity Index Weights'는 설정된 기본 값을 사용하였다.

마지막으로 녹지 냉각 효과의 거리를 나타내는 'Green Area Maximum Cooling Distance'의 경우 100m-700m까지 50m 간격으로 값을 입력하여 InVEST Urban Cooling Model의 유효성 검증에 이용하였다.

3) LST

LST산출을 위해 USGS에서 제공하는 LANDSAT 8 Data Users Handbook(2019)에 제시된 공식을 사용하여 열적

외선밴드의 Digital Number 값을 분광복사량(top-of-atmosphere, 이하 TOA) 값으로 변환시켰다(식 (6)).

$$TOA(L\lambda) = ML * Q_{cal} + AL - Q_i \quad (6)$$

계산된 분광복사량 값(Lλ)과 절대온도(K)의 관계식을 이용해 밝기온도(rightness temperature, 이하 BT)를 계산하였다(식 (7)).

$$BT = \frac{K2}{\left[\left(\frac{K1}{L\lambda} \right) + 1 \right]} \quad (7)$$

이때 구해진 BT는 지표면을 흑체로 가정하여 실제 표면의 방사율(ε)을 고려하지 않은 값이다. 본 연구에선 방사율 보정을 위해 Avdan and Jovanovska(2016)의 NDVI값을 기반으로 한 방사율 추출 방법을 사용하였다.

$$T_s = \frac{BT}{1 + [(\lambda BT / \rho) \ln \epsilon_s]} - 273.15 \quad (8)$$

방사보정은 방사율을 이용해 Avdan and Jovanovska (2016)가 제안한 식을 이용하였다. 이 식은 방사율과 파

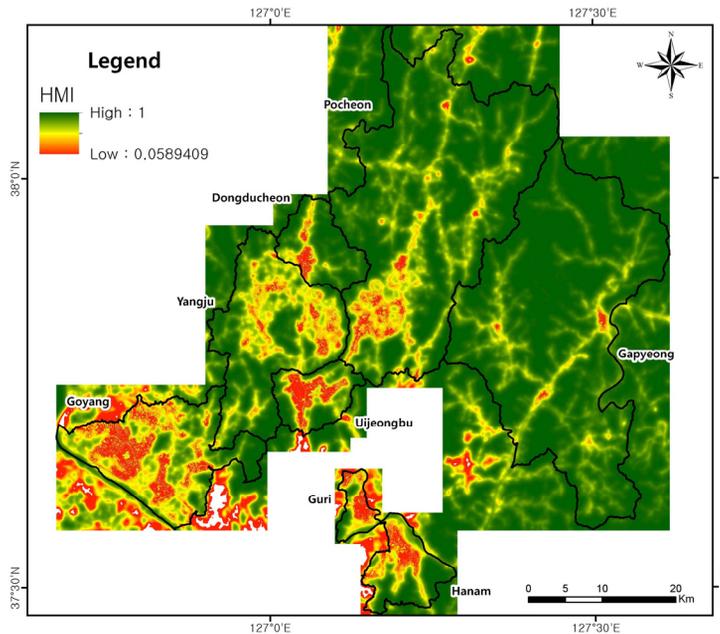


그림 3. InVEST Urban Cooling Model 구동 결과 얻어진 HMI 지도

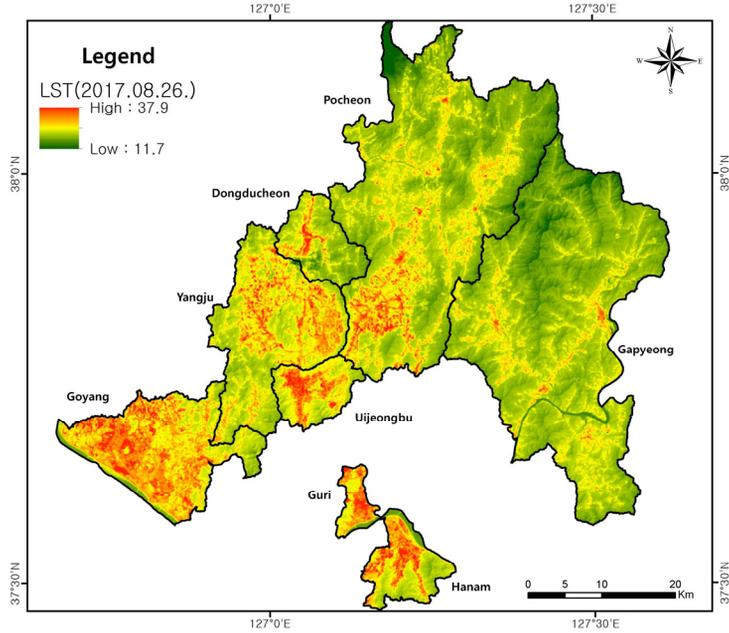


그림 4. Landsat 8를 이용하여 작성한 LST(2017.08.26.) 지도

장, 온도와와의 관계를 이용하는 식으로 T_s 는 방사보정을 실시한 LST의 절대 온도이며 BT 는 기존에 구한 흑체라는 가정하의 LST이다. λ 은 분광복사량을 추출하는데 사용한 밴드의 파장이고 ρ 값은 $hc/K(1.438 * 10^{-2} mK)$ 이다. 이때 h 는 플랑크상수 $6.626 * 10^{-34} Js$ 이고 c 는 빛의 속도 ($2.998 * 10^8 m/s$), K 는 볼츠만 상수 ($1.38 * 10^{-23} J/K$)를 의미한다. ϵ 는 표면 방사율을 의미한다. 계산된 방사 보정온도는 절대온도(K)로 섭씨온도($^{\circ}C$)로 변환하였다.

III. 연구결과 및 논의

1. InVEST Urban Cooling Model과 LST 상관관계 분석

InVEST Urban Cooling Model을 통해 구해진 HMI의 유효성을 검증하기 위해 Landsat 위성을 통해 얻어진 LST와의 관계성을 검토하였다. 이를 위해 Arcmap 10.8.1의 Create Accuracy Assessment Points Tool을 이용하여 연구지역 내 검증 포인트를 토지피복의 면적에 비례하여 임의로 추출하였다. 이때 추출되는 검증 포인트는 토지피복별 최소 10개 이상으로 설정하였다. 추출된 전체

검증 포인트는 총 3,080개였으며, 가장 많은 토지피복은 활엽수림으로 1,182개였다.

그림 5는 50m 간격의 Green Area Cooling Distance 값을 통해 산출된 HMI와 LST와의 상관관계를 보여주고 있다. Green Area Cooling Distance가 150m 부근에서 HMI와 LST의 상관관계를 나타내는 R^2 값이 정점을 찍은 후 Green Area Cooling Distance 값이 증가할수록 상관관계가 점차 낮아지고 있는 것을 보여주고 있다. 즉 이것은 본 연구지역에서 Green Area Cooling Distance의 문턱값은 150m이며, 녹지의 냉각 효과는 그 이상이 되면 점차 감소하고 있음을 보여주는 것으로 해석된다. 이러한 경향성은 그림 6을 통해 다시 확인할 수 있다.

2. 도시 녹지의 냉각거리별 HMI 변화

Zawadzka *et al.*(2021)은 InVEST Urban Cooling Model에서 큰 녹지 공간을 식별하는 데 사용되는 검색 창의 반경과 냉각 거리 설정의 엄밀함과 관련하여 대규모 녹지의 정의 및 해당 공간을 넘어선 냉각 용량 추정치에 영향을 미치는 한 가지 중요한 한계를 발견하였다. 그들은 연구에서 100m 냉각 거리가 지표 온도 데이터와 가장 유사한 열 완화 지수를 반환하고 넓은 녹지 공간을

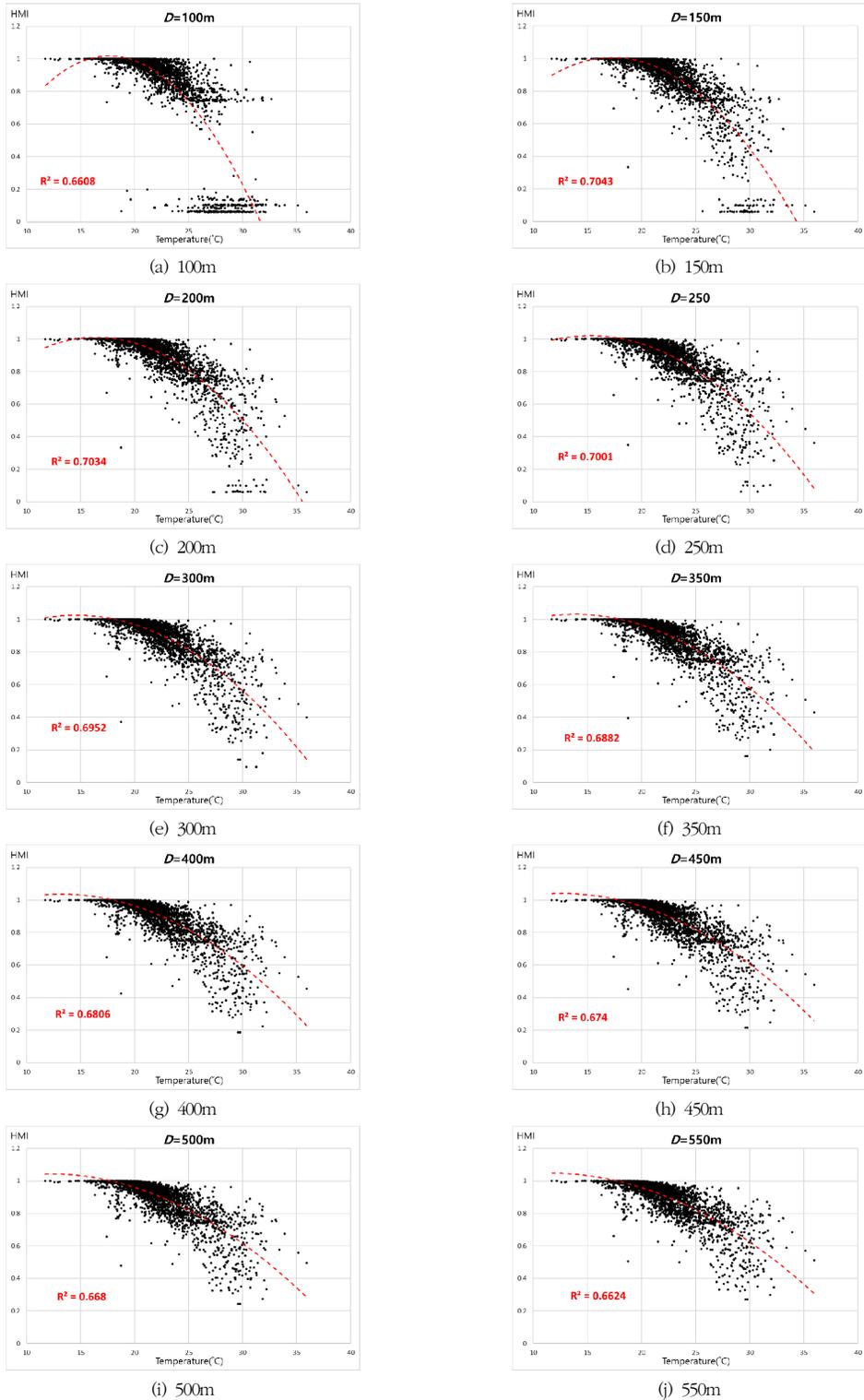


그림 5. 50m 간격의 Green Area Cooling Distance 값을 통해 산출된 HMI와 LST와의 상관관계

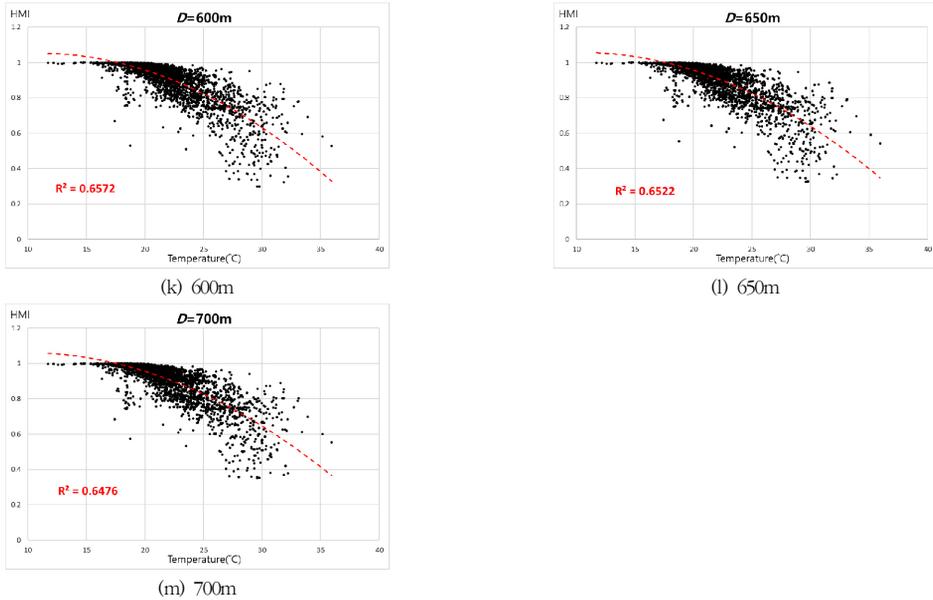


그림 5. 50m 간격의 Green Area Cooling Distance 값을 통해 산출된 HMI와 LST와의 상관관계(계속)

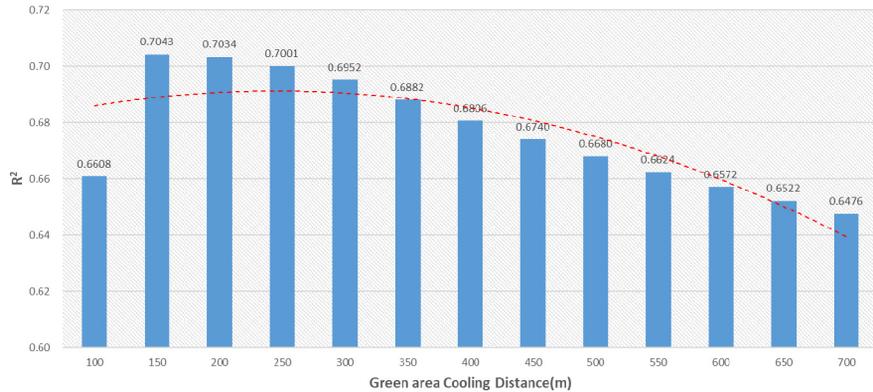


그림 6. Green Area Cooling Distance 거리별 R²의 변화

사실적으로 표현했지만 80m 미만 또는 100m 초과 냉각 거리를 사용하면 큰 녹지 공간의 냉각 용량을 과도하게 표현하여 도시 녹지 공간에 의한 도시 열섬 완화에 따른 생태계 조절 서비스의 가치를 잘못 추정하거나 도시의 기온을 실제보다 낮추는 패턴을 보여준다고 하였다.

이를 본 연구에서 확인하기 위해 고양시 정발산 녹지와 구리시 검배근린공원 녹지를 중심으로 냉각 거리별 열 완화 지수와 위성영상에서 획득된 LST와의 profile을 비교해 보았다.

먼저, 고양시 정발산 녹지 지역을 살펴보면 녹지와 인접하여 단독주택지가 밀집해 있고, 그 경계 바깥쪽으로

고층의 공동주거시설이 위치해 있다. 고층의 공동주거시설지 및 단독주택지 주변으로 소규모의 녹지가 연속적으로 조성되어 있는데, 저층의 단독주택지보다 고층의 공동주거시설지에서 비교적 넓은 녹지 공간을 보여주고 있다(그림 7). 이러한 토지이용의 분포(공동주거시설지 및 단독주택지에 조성된 연속적인 소규모 녹지)는 LST에도 영향을 미치는 것으로 보이는데, 고층의 공동주거시설지 보다 저층의 단독주택지에서 LST가 높게 나타나고 있는 것이다. 열 완화 지수의 경우 냉각 거리 200m 부근에서 LST profile과 유사한 경향을 보여주고 있으며, 그 이상의 냉각 거리에서는 과도한 열 완화 형태

를 보여주고 있다. 또한 100m 미만에서는 열 완화를 전혀 모의하지 못하는 것으로 나타난다(그림 8).
 다음으로, 구리시 검배근린공원 녹지 지역을 살펴보

면 녹지와 인접하여 저층의 공동주택지가 밀집해 있고, 부분적으로 고층의 공동주택시설이 위치하고 있다. 구리시 검배근린공원 부근의 지역은 고양시와는 다르게

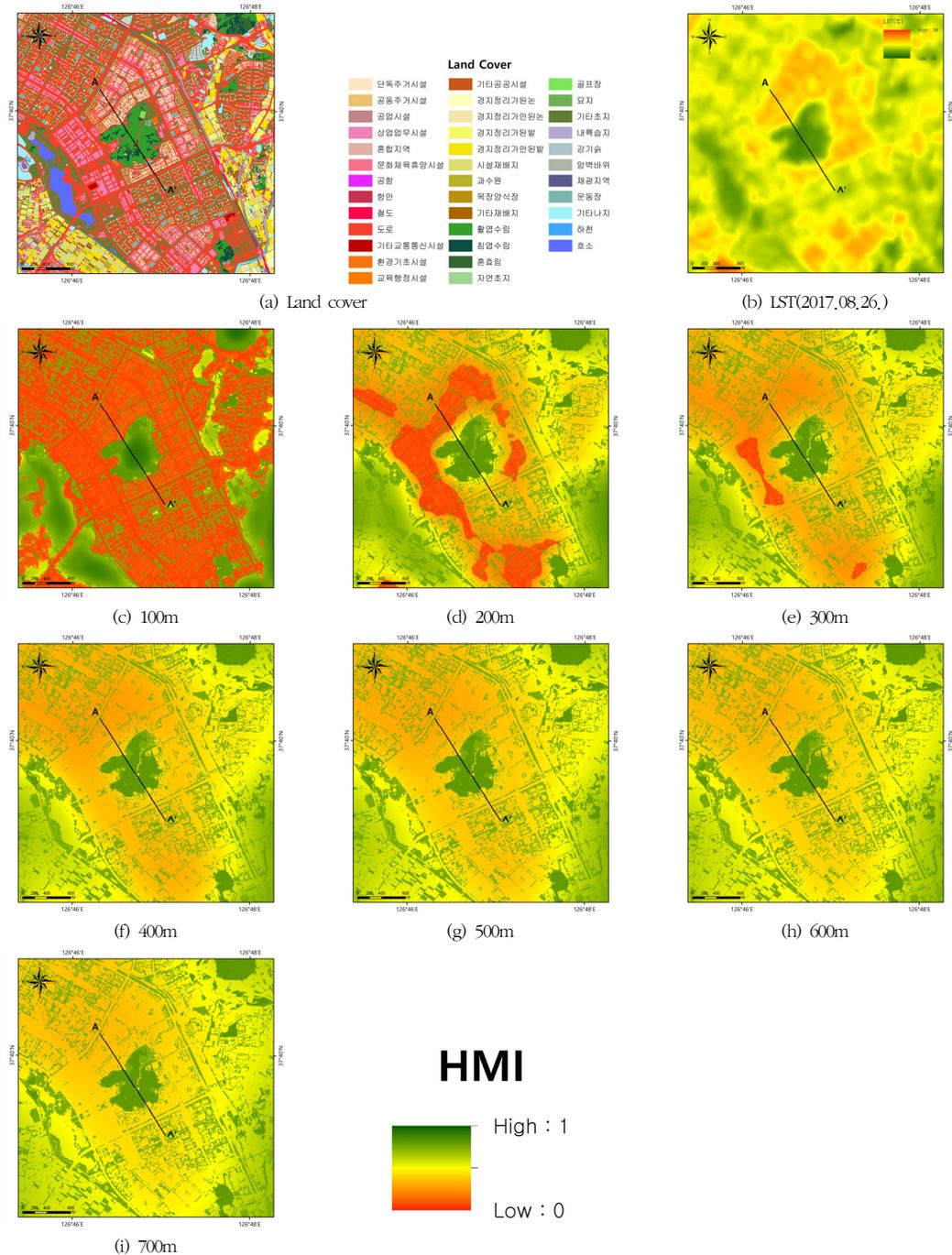


그림 7. 고양시 정발산 녹지 부근의 LST(2017.08.26,11:10)와 Green Area Cooling Distance 변화에 따른 HMI 변화

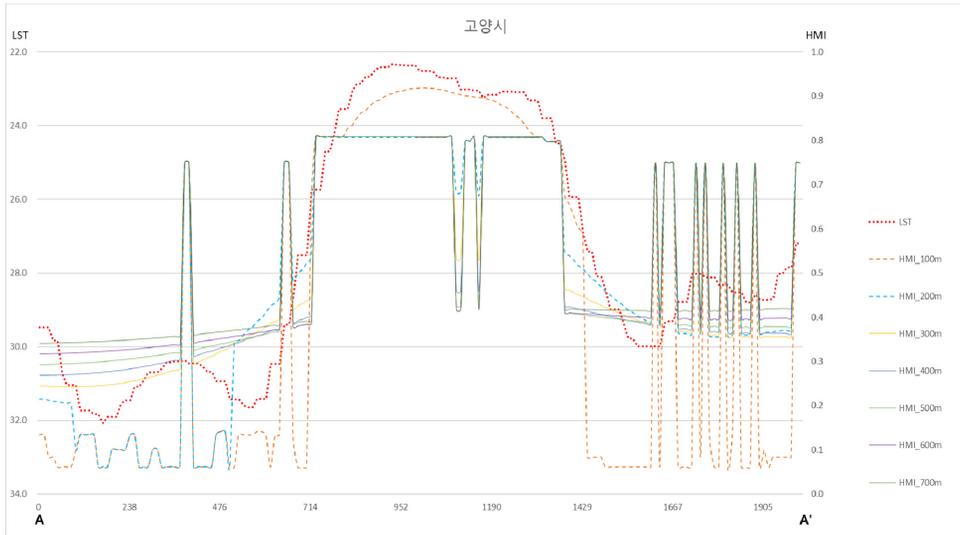


그림 8. 냉각 거리별 열 완화 지수 및 LST의 profile 비교(고양시 정발산 녹지)

저층의 공동주택지 부근에는 연속적인 녹지는 보이지 않는다(그림 9). 이러한 토지이용의 분포는 고양시와는 다른 형태의 열 완화 지수 분포를 보여주고 있다. 고양시 정발산 녹지 지역의 경우 연속적으로 조성된 녹지에 의해 열 완화가 발생하고 있는 것으로 모의 되었으나, 구리시 검배근린공원 녹지 지역에서는 소규모 녹지에 의한 열 완화는 거의 모의 되지 않았다. 열 완화 지수의 경우 냉각 거리가 200m 부근에서 LST profile과 유사한 경향을 보여주고 있다. 이는 고양시의 그것과 매우 유사한 특성을 띠는 것으로 보인다. 또한 200m 이상의 냉각 거리에서는 과도한 열 완화 형태를 보여주고 있으며, 100m 미만에서는 열 완화를 전혀 모의하지 못하는 것도 매우 유사하다(그림 10).

두 지역의 사례를 통해 Zawadzka *et al.*(2021)의 연구에서 보여주었던 InVEST Urban Cooling Model의 한계가 동일하게 나타났지만, 그 한계 범위는 서로 다르게 나타남을 보여주고 있다. 이러한 사실은 특정 도시 내 녹지의 냉각 용량을 추정하는데 있어 변수가 매우 많음을 보여주고 있다.

IV. 토의 및 결론

본 연구를 통해 InVEST Urban Cooling Model을 이용한 도시녹지의 열 완화 가능 거리를 도출할 수 있었다.

연구지역의 경우 녹지에 의한 냉각효과가 앞서 설명한 바와 같이 해외 사례에 비해 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

이러한 차이는 기본적으로 연구지역으로 사용된 시군의 도심지가 산지 사이의 좁은 곡을 따라 위치하고 있고, 도시 내에서 비교적 면적이 큰 녹지(> 2ha)라 하더라도 주변 도심보다 고도가 높은 구릉성 산지로 구성되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 녹지의 해발고도 차이에서 오는 기온 분포 기울기의 차이는 위성영상에서 획득된 LST를 통해서도 확인된다. 도시 외곽 지역의 해발고도가 높은 지역의 경우 InVEST Urban Cooling Model에서 모의된 HMI 보다 LST에서 얻어진 온도분포의 기울기가 훨씬 크게 나타난다. 즉, 도심지와 주변 산지와 고도차가 높은 지역에서 본 모델을 이용하여 얻어진 도시 온도 분포도(HMI 자료를 얻기 위한 중간 단계에서 생성되는 자료 중 하나) 자체에 큰 오류를 내포하고 있는 것이다.

본 연구 결과 InVEST Urban Cooling Model을 이용한 도시녹지의 열 완화 능력을 살펴보기 위해서는 본 모델의 적용 범위를 도심지와 주변 산지와 고도차가 높지 않은 지역이나, 비교적 넓은 평지에 위치하고 있는 도심지에 대해 제한적으로 적용시켜야 할 것으로 판단된다.

또한, 연구에 사용된 자료의 공간해상도 차이(위성영상과 토지피복도의 해상도 차이)로 인해 세밀한 분석이

불가능하였다. 이러한 미비점을 보완하기 위해 추후 연구에서는 산지가 비교적 적은 도심지를 대상으로 무인항공기 탑재 열화상 센서를 이용하여 고해상도의 자료

를 생산한 후 InVEST Urban Cooling Model과 비교하여 본 모델의 유용성을 고해상도로 검토해보고자 한다.

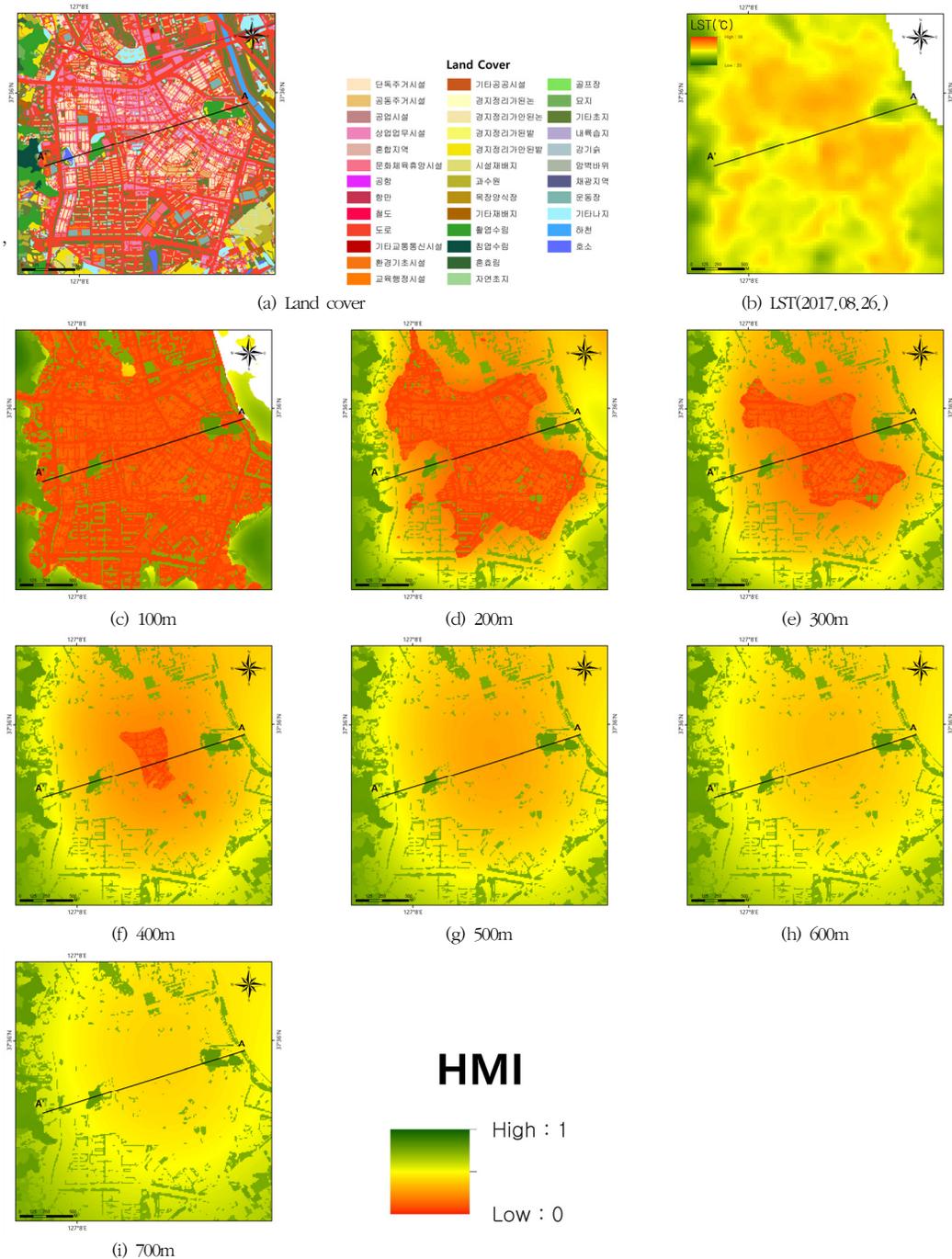


그림 9. 구리시 검배근린공원 녹지 부근의 LST(2017,08,26,11:10)와 Green Area Cooling Distance 변화에 따른 HMI 변화

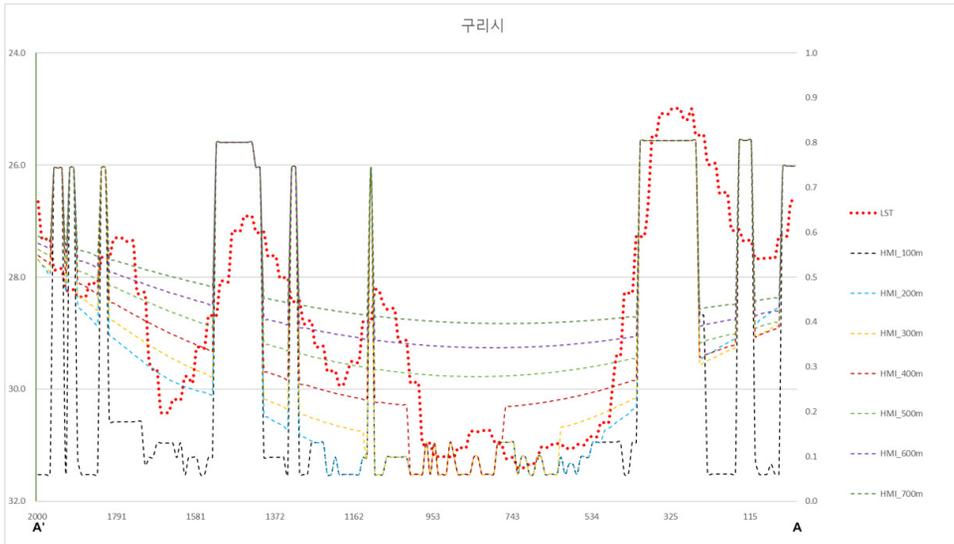


그림 10. 냉각 거리별 열 완화 지수 및 LST의 profile 비교(구리시 검배근린공원 녹지)

註

1) 혼합지역은 주거, 상업·업무, 공업시설이 혼재된 지역을 말한다(토지피복지도 작성지침).

참고문헌

고영주·조기환 2020, “핫스팟 분석을 이용한 도시열섬 취약지 특성 분석 - 전주시를 대상으로 -,” 한국조경학회지, 48(5), 67-79.

권용우·구동희·구자인·김대영·김두일·김선범·김종범·김추윤·남기범·노시하·박지희·변병설·소진광·육한석·유환중·이무용·이지원·이현욱·전경숙·조순철·지종덕·최병두·홍인욱·홍현철·황희연 2001, 「도시의 이해」, 서울: 박영사.

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.

김기열 2010, “MODIS 영상을 이용한 행정구역별 알베도

분포 비교평가” 경북대학교 석사학위논문.

김동우·유재진·윤정호·손승우, 2019, “UAV 열적외 카메라를 활용한 폭염 시 시가지의 표면온도 변화 분석” 한국지리학회지, 8(1), 47-60.

박은빈·한경수·이창석·피경진 2012, “MODIS 16-Day Albedo 자료를 이용한 동북아시아 지역의 토지피복별 알베도 변화 분석” 대한원격탐사학회지, 28(5), 501-508.

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.

Avdan, U. and Jovanovska, G., 2016, Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data, *Journal of Sensors*, 2016, 1480307, 1-8.

Kunapo, J., Fletcher, T.D., Ladson, A.R., Cunningham, L., and Burns, M.J., 2018, A spatially explicit framework for climate adaptation, *Urban Water Journal*, 15(2), 159-166.

McDonald, R.I., Kroeger, T., Boucher, T., Wang, L., and

- Salem, R., 2016, *Planting Healthy Air: A global analysis of the role of urban trees in addressing particulate matter pollution and extreme heat*, Arlington: The Nature Conservancy.
- USGS, 2019, *Landsat 8(L8) Data Users Handbook, Version 5.0*, Sioux Falls, South Dakota: EROS.
- Zardo, L., Geneletti, D., Prez-soba, M., and Van Eupen, M., 2017, Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning, *Ecosystem Services*, 26, 225-235.
- 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.
- 기상청 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/>
- 환경부(환경공간정보서비스), <https://egis.me.go.kr/>
- Global Surface UHI Explorer, <https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap>
- Natural Capital Project, <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/>
- NTSG(Numerical Terradynamic Simulation Group), <http://www.ntsug.umt.edu/>
- 교신 : 김장수, 32588, 충청남도 공주시 공주대학교 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: 2022년 11월 3일
심사완료일: 2022년 11월 23일
게재확정일: 2022년 11월 29일

