

UAV 기반 도시 열환경 분석을 통한 폭염 대응형 공간 전략: 부산시 영도구 도시재생사업을 대상으로*

김건형** · 강영은*** · 손승우**** · 김동우***** · 유재진*****

A Study on the Spatial Strategies in Response to Heat Waves through Analyzing Urban Thermal Environment by UAV: Based on the Urban Regeneration Project in Yeongdo-gu, Busan*

Keonhyeong Kim** · Youngeun Kang*** · Seung Woo Son**** · Dongwoo Kim***** · Jae Jin Yu*****

요약 : 본 연구에서는 폭염 시 표면 온도에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 기반 열적외 카메라로 정사영상을 구축하였다. 이를 바탕으로 도시기후구역 유형과 토지피복 유형별 표면 온도를 분석하고 표면 온도 영향 요인을 파악하였다. 연구 결과, 도시기후구역 유형으로 보았을 때, 포장된 도로, 저층건물 고밀지역, 고층건물 고밀지역, 화분식 녹지, 경작지, 건물 사이 녹지 순으로 높게 나타났으며, 토지피복 유형으로 보았을 때, 도로, 교육·행정시설, 상업·업무시설, 단독주거지역, 기타나지, 경지정리가 안 된 밭, 공동주거지역, 기타초지 순으로 높게 나타났다. 또한 시실물의 옥상 재질과 색상, 주변 녹지 유무에 따라서 표면 온도가 다르게 나타나는 경향을 확인하였다. 본 연구는 고해상도 열적외 영상을 기반으로 취약계층 밀집 거주지역인 도시재생사업 대상지의 표면 온도 분포지도를 구축하고 향후 회복력이 높은 도시재생지 계획에 적용할 수 있는 연구로서 의의가 있다.

주요어 : UAV(Unmanned Aerial Vehicle), 기후변화 적응, 도시 열환경, 표면 온도, 도시재생

Abstract : In this study, we constructed a orthomosaic image with thermal infrared camera based on UAV (Unmanned Aerial Vehicle) to identify the factors affecting surface temperature during heat wave. Based on this, surface temperature of each type of LCZs (Local Climate Zones) and land cover was analyzed and the factors of surface temperature influence were identified. As a main result of this study, the surface temperature was high in the order of 'Bare rock or paved', 'Compact row rise', 'Compact high rise', 'Low plants 1 (Greenery with flowerpot)', 'Low plants 2 (Farmland)', and 'Brush, scrub (Greenery between buildings)', based on the type of LCZs. On the type of land cover, the surface temperature was high in the order of 'Roads', 'Education and administrative facilities', 'Commercial and business facilities', 'Detached residential area', 'Other bare land', 'Unarranged farm', 'Co-residential area' and 'Other greenery'. Also, it was found that the surface temperature

*본 논문은 한국연구재단의 기초연구과제(2017R1D1A3B03032120)로 지원받아 수행하였음.

**㈜사이트플래닝건축사사무소 기업부설연구소 대리(Researcher, Siteplanning Co., Ltd., kim4@siteplanning.co.kr)

***㈜사이트플래닝건축사사무소 기업부설연구소 소장(Research Director, Siteplanning Co., Ltd., jiyoon8936@gmail.com)

****한국환경정책·평가연구원 전문연구원(Research Specialist, Korea Environment Institute, swson@kei.re.kr)

*****한국환경정책·평가연구원 연구원(Researcher, Korea Environment Institute, clwkim@kei.re.kr)

*****한국환경정책·평가연구원 연구원(Researcher, Korea Environment Institute, jiyu@kei.re.kr)

was different depending on the material and color of the facility of roof, and whether or not surrounding green land was present. Based on high-resolution thermal infrared images, this study are meaningful as it has constructed and analyzed the surface temperature distribution map of the target area of urban regeneration, a residential area with dense population of vulnerable people.

Key Words : UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Climate change adaptation, Urban thermal environment, Surface temperature, Urban regeneration

I. 서론

2018년 9월 국가재난으로 지정된 폭염은 최근 기후변화에 의해 발생빈도가 증가하고 있다. 폭염이란 극한 더위 또는 열파라고 부르며, 일반적으로 갑작스럽게 찾아오는 심한 더위로서 일정 온도 이상의 기온이 수일 동안 지속되는 기상현상으로 정의한다(하중식 등, 2014). 또한 기상청 폭염특보 기준에 따르면, 폭염주의보는 일 최고기온이 33°C 이상 2일 연속 지속될 것으로 예측될 때, 폭염경보는 일 최고기온이 35°C 이상 2일 연속 지속될 것으로 예측될 때 발령된다(기상청 날씨누리). 2018년의 폭염일수(일 최고기온 33°C 이상)가 31.4일(평년 9.8일), 열대야일수(밤 최저기온 25°C 이상) 17.7일(평년 5.1일)로 1973년 이후 가장 많은 이례적인 폭염이 발생하였으며, 식중독환자, 온열질환자, 한랭질환자 발생 수가 역대 최다를 기록하였다(기상청, 2019). 기후변화에 관한 정부 간 패널인 제5차 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 보고서에서는 21세기 동안 전 세계적으로 지구온난화가 가속화될 것으로 전망하고 있으며, 인간의 활동이 가장 활발한 도시지역에서 발생하는 폭염의 위험 가능성 또한 증가할 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2014).

이러한 도시지역의 폭염을 가속화시키는 요인 중 하나로 도시열섬현상이 지목되고 있다(권용석, 2018). 도시 열섬현상은 도시의 기온이 교외지역에 비해 높게 나타나는 현상으로 아스팔트 도로, 간판, 창문 등의 인공구조물에서 발생하는 복사열과 냉방 및 난방기의 배출열, 고층건물 밀집에 의한 공기순환 저하, 그리고 녹지 면적 감소 등이 발생 원인으로 제시되고 있다(오규식·홍재주, 2005; 안지숙 등, 2012; 서보용·정응호, 2017).

최근 사회경제적 여건과 도시정책 패러다임의 변화로 쇠퇴한 도시의 경제·사회·물리·환경적 특성을 고려한 도시재생이 요구되고 있으며, 노후화된 공동주택이

나 다가구·다세대 주택, 상업·업무시설 등이 밀집하고 있는 도시 내 쇠퇴지역의 경우 기후변화에 대응력이 약하고 도시재해에 따른 피해가 상대적으로 큰 실정이다(왕광익 등, 2013). 도시재생에서 기후변화 대응이 필수요건은 아니지만, 도시숲 도시재생 모형, 미세먼지 저감, 기후변화 대응 등 기후환경에 대응하기 위한 다양한 도시재생 사업 유형이 증가하고 있는 추세이다. 관련하여 다양한 지자체의 사례를 손꼽을 수 있는데, 이 중 김해시는 '2019년 기후변화 적응성과 및 발전방향 심포지엄'에서 도시재생사업 대상지에 기후변화 취약성을 고려한 맞춤형 적응 인프라를 집중적으로 조성해 우수사례로 꼽혔으며(위클리오늘, 2019년 12월 19일자), 고양시는 고양시형 도시재생 방향을 고민하고, 환경과 도시가 공존하는 도시 발전을 지속해서 모색하고자 '2019 고양도시포럼(도시재생&환경)'을 개최하는 등 지자체 단위로 기후변화에 대응한 도시재생을 실현하기 위해 노력하고 있다(연합뉴스, 2019년 9월 2일자).

선행된 기후변화 대응 도시재생사업에 관한 연구를 살펴보면, 기후변화에 따른 공간적 문제에 대한 정책 제안 연구(서태성 등, 2008; 왕광익 등, 2009; 왕광익 등, 2012), 기후변화에 대응한 도시재생 정책과제, 계획수립에 관한 연구(왕광익 등, 2013; 김진목·김세용, 2015), 기후변화에 대응한 도시재생 지표개발 및 활성화지역 선정 연구(유선철·여관현, 2015) 등으로 유형화할 수 있다.

정리해보면, 기후변화에 따른 도시재생사업의 공간적 문제, 정책과제, 계획(안) 제안, 전략 반영 등을 주로 다루고 있으며, 기존 도시쇠퇴도 분석에 기후변화 대응 관련 지표를 포함한 도시재생활성화지역 선정 사례연구도 진행되었으나, 기후변화 취약지역을 실질적으로 개선시키기 위한 현장중심의 연구가 부족하다.

이에 본 연구는 부산광역시 도시재생사업 대상지 중 폭염에 대한 리스크가 높은 지역을 연구 대상으로 선

정하여, 열환경을 실질적으로 파악할 수 있는 표면 온도 분포지도 구축 및 폭염 영향 요인을 분석함으로써 폭염에 대응한 도시재생 계획에 시사점을 제시하고자 한다.

II. 연구지역과 연구방법

1. 연구지역

연구지역은 부산광역시 영도구 봉래2동에 위치한 봉산마을로 선정하였다. 영도구의 최근 5년간(2014~2018년)의 여름철 기온변화를 살펴보면, 평균 기온이 2014년 21.8°C에서 2018년 22.7°C로 약 0.9°C 증가하였으며, 평균 최고기온이 2014년 25.1°C에서 2018년 26.4°C로 약 1.3°C 증가하는 경향을 보이고 있다(기상자료개방포털). 봉산마을은 부산시 내 도시재생사업 대상지로 선정된 지역 중 2018년 기준 열대야일수가 43일(기상자료개방

포털)로 전국 연평균 17.7일보다 월등히 많아 폭염에 대한 리스크가 상대적으로 높은 지역이다. 면적 46,787m²의 봉산마을은 피난시절 지어진 노후건축물과 뉴타운, 재개발로 인해 고밀주거환경이 조성되어 있으며, 조선경기 불황 등으로 인해 공·폐가가 지속적으로 증가하는 지역이다(그림 1).

도시재생 뉴딜사업(베리베리 굿 봉산마을 복덕방)이 2018년부터 3년간 시행되고 있는 봉산마을은 대부분이 일반주거지역(97%)이며, 400여 채의 건물 중 30년 이상 노후건축물이 약 88%, 공폐가 87채(폐가 41, 공가 30, 나대지 16)가 분포하고 있다. 도시재생 뉴딜사업 주요 내용은 주거환경재생(집수리 지원 사업, 기능복합형 공공 임대주택), 생활환경재생(코워킹 스페이스 공간조성, 오동꽃길 보행환경개선), 재생마을일자리(베리베리 스마트 농장, 베리베리 잼 상가), 마을공동체재생(봉산복덕방 운영, 현장지원센터 운영, 파머스 마켓 운영)의 4개 분야로 시행되고 있다(그림 2).

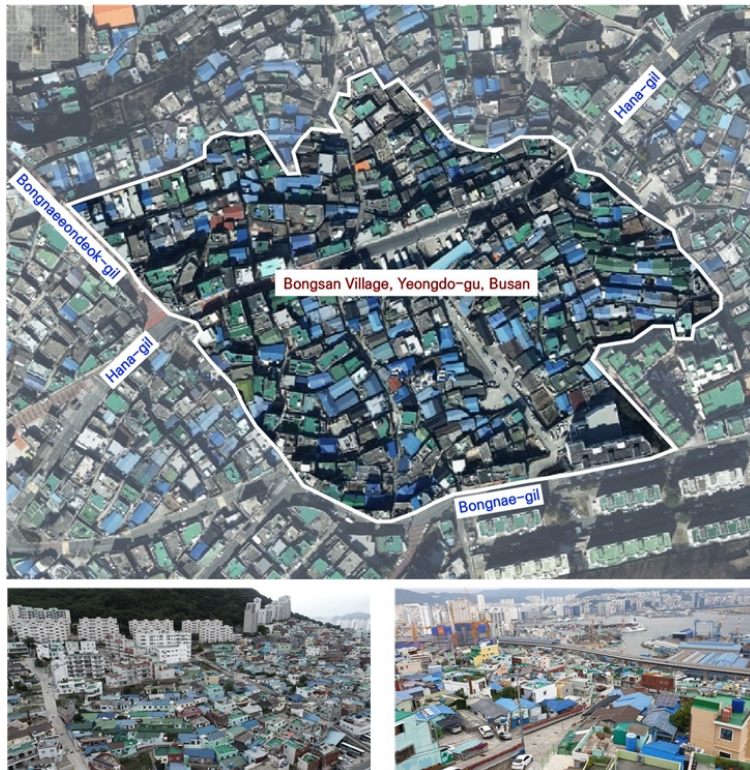


그림 1. 연구지역 위치도

* 저자 촬영(2019년 8월) 및 지도 구축.



그림 2. 연구지역 도시재생뉴딜사업 주요 내용

출처 : 오피니언뉴스, 2018년 8월 2일자.

2. 연구내용 및 방법

본 연구의 큰 흐름을 살펴보면, 연구지역 내 도시 구조적으로 열환경에 취약한 공간을 파악하기 위하여 도시 기후구역 유형에 따른 도시기후구역 선정 및 세분류 토지피복 유형에 따른 토지피복도 구축을 하고 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 기반 열적외·광학 영상촬영을 통한 표면 온도 분포지도 구축 및 분석하는 것으로 구성된다(그림 3).

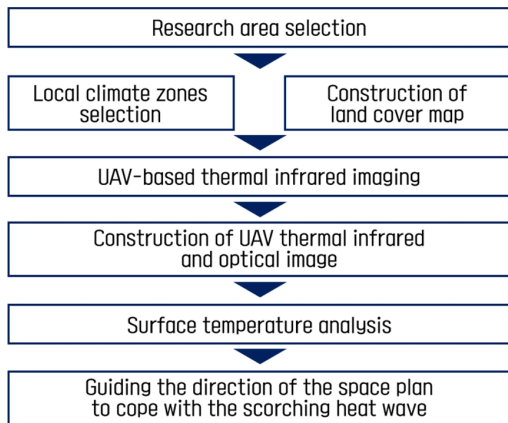


그림 3. 연구 흐름도

1) 도시기후구역 선정 및 토지피복도 구축

(1) 도시기후구역 선정

도시기후구역(Local Climate Zones, LCZs)이란, Stewart and Oke(2012)가 개발하고 World Urban Database and Access Portal Tools(WUDAPT)에서 제공하고 있는 도시 내 기후구역 분류체계로, 도시구조 특성에 따라 동일한 열환경 특성을 가진 공간들을 유형화한 분류 방법론이다. 이를 통해 도시기후구역 유형에 따른 열환경 개선방안을 구체적으로 제시할 수 있으며, 모든 도시를 대상으로 적용이 가능하여 점차 전 세계적으로 확대되고 있다(김권·엄정희, 2017).

이에 본 연구에서는 연구지역의 열환경 개선이 필요한 요인을 구체적으로 도출하기 위해서는 도시구조 특성에 따라 도시기후구역 유형으로 구분된 공간자료가 필요하므로 연구지역 내 도시기후구역 분류체계에 따라 해당하는 도시기후구역을 선정하였다. 연구지역 내 선정된 도시기후구역 유형은 ‘Compact high rise(고층건물 고밀지역)’, ‘Compact row rise(저층건물 고밀지역)’, ‘Bare rock or paved(포장된 도로)’, ‘Brush, scrub(건물 사이 녹지)’, ‘Low plants1(화분식 녹지)’, ‘Low plants 2(경작지)’로 총 6개로 분류되었다.

(2) 토지피복도 구축

연구지역의 토지피복도는 환경부에서 제공하는 2013년 영남권역 세분류 토지피복도를 활용하여 구축하였다. 연구지역의 세분류 토지피복 유형은 8개로 공동주거지역, 단독주거지역, 상업·업무시설, 교육·행정시설, 도로, 경지정리가 안 된 밭, 기타나지, 기타초지로 분류되었다. 취약계층 주거지 밀집지역인 연구 대상지는 토지피복 유형 중 단독주거지역이 대부분을 차지하고 있으며, 대상지 내 부지 전체를 가로지르는 도로와 도로 주변으로 상업·업무시설이 분포하고 있다.

2) UAV 기반 정사영상을 활용한 표면 온도 지도 구축

지역의 열환경을 분석하기 위해 기상관측장비와 위성영상의 열적의 센서에서 측정된 기온, 표면 온도 자료가 활용되고 있다. 하지만 기상관측장비는 한 지점에 고정되어 있을 뿐만 아니라 분포가 균일하지 않은 한계가 있다. 위성영상은 주기적으로 넓은 지역의 영상을 수집할 수 있으며, 도시지역의 팽창 분석(박샘·최광용, 2016), 가뭄지역 식생 모니터링(김동우 등, 2017) 등 도시와 폭염 및 가뭄에 관한 연구에 활용되고 있다. 하지만 위성영상은 공간해상도가 낮고, 촬영주기와 기상조건에 영향을 받는다는 단점이 있다(김동우 등, 2019). 반면 UAV는 위성영상보다 비교적 원하는 시기에 비행을 통해 고해상도 영상을 획득할 수 있는 장점이 있으며, 최근 UAV기반으로 촬영한 열적의 영상을 이용하여 표면 온도 분포지도도를 구축하고, 열환경을 분석하는 다양한 연구가 진행되고 있다(Gaitani *et al.*, 2017; Webster *et al.*, 2018).

이에 본 연구에서는 UAV기반 공중에서의 열적의·광학 영상촬영을 실시하여, 도시재생지 사업지를 대상으로 표면 온도 분포지도도를 구축하였다.

(1) UAV 기반 열적의 영상 및 광학 영상촬영

연구지역 표면 온도 분석을 위해 2019년 8월 20일 UAV 기반의 열적의 및 광학 영상 카메라를 활용하여 영상촬영을 실시하였다. 열적의 영상촬영에는 DJI사의 Inspire 1 pro와 열적의 카메라인 Zenmuse XT를 사용하였으며, 광학 영상촬영에는 DJI사의 Mavic pro와 자체 장착된 광학 카메라를 활용하였다(표 1). 촬영일시의 평균 기온과 최고기온은 약 26.2°C와 약 28.1°C로 기록되었으며, 풍속은 평균 약 5m/s로 UAV 비행 및 영상촬영에 적합하였다. 해당 기상정보는 연구지역 인근의 영도구 신선동 3가 방재기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)에서 측정되었다.

① 지상기준점(Ground Control Points, GCP) 설정

본 연구에서 활용한 UAV인 Inspire 1 pro와 Mavic Pro에는 GNSS(Global Network Satellite System)가 탑재되어 있어 영상촬영 시 위치정보가 포함되지만, VRS-RTK GNSS를 이용한 지상측량 보다는 상대적으로 위치정확도가 낮기 때문에 GCP를 설정을 통한 위치정확도 향상이 필요하다. GCP는 촬영 대상지의 면적과 고저차 등을 고려하여 배치할 수 있으며, 촬영 면적 20,000m² 별로 1개의 GCP를 지정할 시 높은 정확도가 확보되는 것으로 알려져 있다(손승우 등, 2017; Coveney and Roberts, 2017). 본 연구에서는 Trimble사의 R8s를 활용하여 도로

표 1. UAV 및 카메라 상세정보

UAV		
Model	Inspire 1 pro	Mavic pro
Weight	2935g	734g
Maximum flight time	18minutes	27minutes
Maximum flight speed	22m/s	18m/s
Camera		
Model	Zenmuse XT	Mavic Pro 1/2.3" CMOS
Image size	640×512(pixel)	4000×3000(pixel)
Spectral band	7.5~13.5µm	RGB
Scene range	-25 to 135°C	-

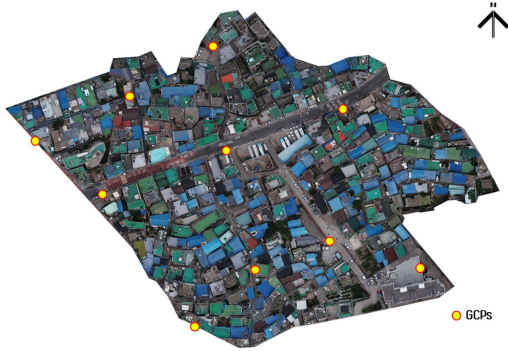


그림 4. R8s를 이용한 GCP 좌표 측량과 GCP의 위치

중앙선, 연석, 건물옥상 등을 대상으로 10개의 GCP를 설정하여 지상측량을 실시하였다(그림 4).

② UAV 기반 열적외·광학 영상촬영

연구지역의 UAV 기반 열적외 영상촬영은 2019년 8월 20일 오전 9시 30분부터 40분간 1회 실시하였으며, UAV 기반 광학 영상촬영은 오전 10시 30분부터 30분간 1회 실시하였다(그림 5). 영상촬영 시간대를 오전으로 설정한 이유는 오전이 오후보다 전반적으로 표면 온도 값은 낮을 수 있지만, 표면 온도를 비교하기 위한 대상 간의 온도 격차는 오후가 오전보다 상대적으로 낮을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폭염의 영향을 받는 대상 간의 격차를 명확하게 파악하기 위해 오전에 영상촬영을 진행하였다. UAV 기반 영상촬영과 자동비행은 스위스 Pix4d社の Pix4d capture 어플리케이션을 활용하였다. 열적외 영상촬영을 위한 UAV의 비행 변수는 촬영 대상의 면적과 촬영 영상의 해상도를 고려하여 비행고도 60m, 영상

촬영 중·횡중복도 모두 85%로 설정하였다. 광학 영상은 비행고도 75m, 영상촬영 중·횡중복도 모두 85%로 설정하여 촬영하였다. 비행 결과, 열적외 영상은 오전과 오후 각각 621개와 604개, 그리고 광학 영상은 410개의 영상을 수집하였다.

(2) UAV 정사영상 구축

UAV 기반으로 촬영한 열적외, 광학 영상은 스위스 Pix4d社の Pix4DMapper 4.3 소프트웨어를 활용하여 정사영상으로 정합하였다. Pix4DMapper에서 정사영상 제작에 사용된 알고리즘은 촬영 대상이 중복된 영상간의 동일한 특징구조를 찾아 영상을 정합하는 SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 알고리즘과 다중 위치에서 촬영된 2차원 영상에서 촬영 당시 카메라의 위치와 방향을 재구성하여 촬영 대상을 3차원으로 구현하는 SfM(Structure from Motion) 알고리즘이다. 또한 GCP측량을 통해 확보한 좌표를 삽입하여 정사영상을 절대표정 하였으며, 좌표계는 Korea 2000/Cental Belt 2010(EPSG: 5186)으로 정사영상을 제작하였다. 이를 통해 열적외 정사영상과 광학 정사영상을 각각 1개씩 구축하였으며, 상세정보는 표 2와 같다.

표 2. 정사영상별 상세정보

Thermal Infrared Image Orthomosaics	
Flight time	Spatial Resolution
2019. 08. 20 AM 09:30	12cm
Optical Image Orthomosaics	
Flight time	Spatial Resolution
2019. 08. 20 AM 10:30	3cm



그림 5. 열적외 영상촬영에 사용한 장비(Inspire 1 pro) 및 촬영 장면

출처 : 2019년 8월 저자 촬영.

(3) 표면 온도 분석 및 검증

2019년 8월 20일에 촬영하여 구축한 표면 온도 정사영상을 바탕으로 여름철 연구지역의 표면 온도를 분석하였다. 먼저 연구지역의 열화상지도를 구축한 뒤, 표면 온도 분포를 알아보기 위해 온도구간별 비율을 계산하였다. 또한 공간적 특성에 따른 표면 온도 파악을 위해 ArcGIS 10.1의 zonal statistics 툴을 이용하여 도시기후구역 유형별, 토지피복 유형별 표면 온도 값을 계산하였다. 그리고 표면 온도의 분포가 연구지역 내 공간에 따라 군집 경향을 보이는지를 검증해보기 위해 ArcGIS 10.1의 spatial autocorrelation(Moran's I) 툴과 cluster and outlier analysis(Anselin local Moran's I) 툴을 이용하여 공간적 자기상관 관계를 파악하였다. 상기의 분석 과정과 결과를 바탕으로 여름철 연구지역 내 폭염에 영향을 주는 요인을 도출하여 각 요인에 대한 도시재생 방안을 마련하고자 하였다.

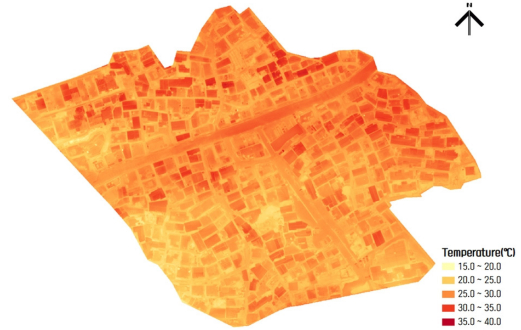


그림 6. 연구지역의 열적의 정사영상(열화상지도)

표 3. UAV 열적의 정사영상 표면 온도 비율

Temperature (°C)	Ratio (%)
15.0~20.0	0.47
20.0~25.0	11.28
25.0~30.0	55.10
30.0~35.0	31.92
35.0~40.0	1.23

III. 연구결과

1. 표면 온도 분석 및 검증

1) 열적의 정사영상 구축 및 표면 온도 분석

기후변화 동인인 폭염에 취약한 도시재생사업 대상지역인 연구지역의 표면 온도를 분석하기 위해 2019년 8월 20일 오전에 UAV 열적의 영상촬영을 통해 정사영상(열화상지도)을 구축하였다(그림 6, 표 3). 연구지역 표면 온도의 구간을 설정하여 그에 따른 비율분포를 살펴본 결과, 표면 온도 25.0~30.0°C 구간이 차지하는 비율이 전체의 약 55.10%로 가장 높게 나타났으며, 20.0~35.0°C 구간이 차지하는 비율이 전체의 약 98.30%로 연구지역 표면 온도의 대부분이 해당 구간에 분포하는 것으로 나타났다. 본 열화상지도는 표면 온도를 확인하는 것뿐만 아니라, 추후 논의될 UAV 광학 영상과 비교하여 표면 온도에 영향을 미치는 요인 도출에 활용될 수 있다.

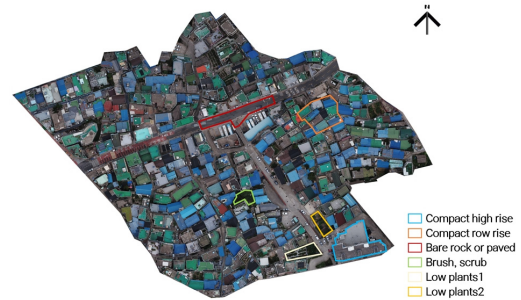


그림 7. 연구지역의 도시기후구역 구분

2) 도시기후구역 유형별 표면 온도 분석

연구지역 내 열환경 개선에 필요한 요인을 구체적으로 도출하기 위해 도시기후구역 유형에 따른 표면 온도 최솟값, 평균값, 최댓값을 분석하였다(그림 7, 표 4). 도시기후구역 유형별 표면 온도는 포장된 도로가 약

32.07°C로 가장 높았으며, 그다음 저층건물 고밀지역 약 31.85°C, 고층건물 고밀지역 약 27.17°C, 화분식 녹지 약 26.46°C, 경작지 약 25.87°C, 건물 사이 녹지 약 23.95°C 순으로 나타났다. 표면 온도 최댓값은 저층건물 고밀지역이 약 36.29°C로 가장 높았으며, 그다음 포장된 도로 약 33.73°C, 고층건물 고밀지역 약 30.57°C, 경작지 약 30.03°C, 화분식 녹지 약 29.31°C, 건물 사이 녹지 약 28.46°C 순으로 나타났다. 연구지역 내 도시기후구역 중 표면 온도 평균값과 최댓값이 모두 높은 저층건물 고밀지역과 포장된 도로가 우선적으로 열환경 개선이 필요한 구역으로 나타났다.

표 4. 도시기후구역 유형별 표면 온도 값

Local climate zones	Temperature (°C)		
	Min	Mean	Max
고층건물 고밀지역 (Compact high rise)	20.51	27.17	30.57
저층건물 고밀지역 (Compact row rise)	23.08	31.85	36.29
포장된 도로 (Bare rock or paved)	27.33	32.07	33.73
건물 사이 녹지 (Brush, scrub)	22.59	23.95	28.46
화분식 녹지 (Low plants 1)	24.47	26.46	29.31
경작지 (Low plants 2)	24.18	25.87	30.03

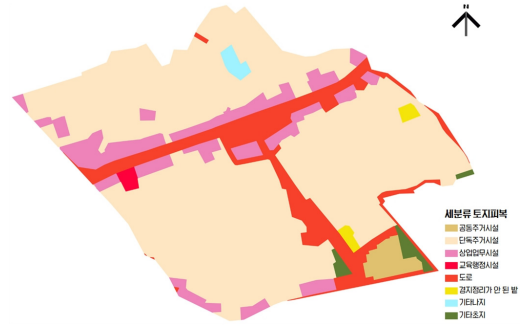


그림 8. 연구지역의 토지피복도

표 5. 세분류 토지피복 유형별 표면 온도 값

Land cover type	Temperature (°C)		
	Min	Mean	Max
공동주거지역	20.51	27.16	30.57
단독주거지역	19.14	29.13	37.87
상업·업무시설	18.65	29.22	35.68
교육·행정시설	24.01	29.32	33.42
도로	21.59	29.55	37.93
경지정리가 안 된 밭	24.18	27.97	34.88
기타 나지	26.23	28.98	35.04
기타초지	24.16	26.89	30.68

3) 토지피복 유형별 표면 온도 분석

연구지역의 표면 온도를 공간적으로 분석하기 위해 세분류 토지피복 유형에 따른 표면 온도 최솟값, 평균값, 최댓값을 계산하였다(그림 8, 표 5). 세분류 토지피복 유형별 표면 온도는 도로가 약 29.55°C로 가장 높았으며, 다음으로 교육·행정시설, 상업·업무시설, 단독주거지역, 기타 나지가 약 29.00°C 이상, 경지정리가 안 된 밭 약 27.97°C, 공동주거지역 약 27.16°C, 기타초지 약 26.89°C 순으로 나타났다. 표면 온도 최댓값은 도로와 단독주거지역이 약 37.87°C로 가장 높았으며, 상업·업무시설 약 35.68°C, 기타 나지 약 35.04°C, 경지정리가 안 된 밭 약 34.88°C, 교육·행정시설 약 33.42°C, 기타초지 약 30.68°C, 공동주거지역 약 30.57°C 순으로 나타났다. 표면 온도 평균값과 최댓값이 모두 높은 토지피복 유형은 도로, 단독주거지역, 상업·업무시설로 우선적으로 열환경 개선이 필요한 유형이라 할 수 있다.

4) 표면 온도에 따른 공간적 자기상관성 분석

이경주 등(2015)에 따르면, 공간적 자기상관성은 지리적 인접성(geographical proximity)을 전제로 유사한 값들의 군집경향을 지칭하며, 공간적 자기상관성을 정량적으로 측정하는 다양한 지수들 중 가장 보편적으로 활용되는 통계지수는 Moran's I 통계량(이하 I 통계량)이라 한다. 또한 I 통계량은 전역적 I 통계량(global I statistic)과 이를 구성하는 국지적 I 통계량(local I statistic)으로 구분되며, 전역적 I 통계량은 연구지역 내 비슷한 값들

이 군집을 이루며 분포하려는 전반적인 경향을 나타내며, 국지적 I 통계량은 연구지역 내 특정 단위지역을 중심으로 주변 단위지역들이 얼마나 비슷한 값을 가지는지를 가늠할 수 있다고 한다. 따라서 본 연구에서는 연구지역 내 표면 온도 값들이 군집을 이루며 분포하는지와 비슷한 값들을 가지는 특정 단위지역은 어떻게 분포하는지를 파악하기 위해 ArcGIS 10.1을 이용하여 공간적 자기상관성 분석을 시행하였다.

먼저, 연구지역의 전역적 I 통계량 분석을 시행하기 위해 ArcGIS 10.1의 spatial autocorrelation(Moran's I) 툴을 활용하였다. 그 결과, Moran's I=0.913921로 높은 '정적 공간상관'을 가지는 것으로 나타났고, z-score=285.522038, p-value=0.000000으로 연구지역 내 표면 온도 값들이 높은 정적 공간상관으로 군집하는 것을 알 수 있었다(그림 9). 다음으로 국지적 I 통계량 분석을 시행하기 위해 ArcGIS 10.1의 cluster and outlier analysis(Anselin local Moran's I) 툴을 활용하였다. 그 결과, 표면 온도가 높은 값들이 분포하는 HH지역과 낮은 값들이 분포하는 LL지역이 도출

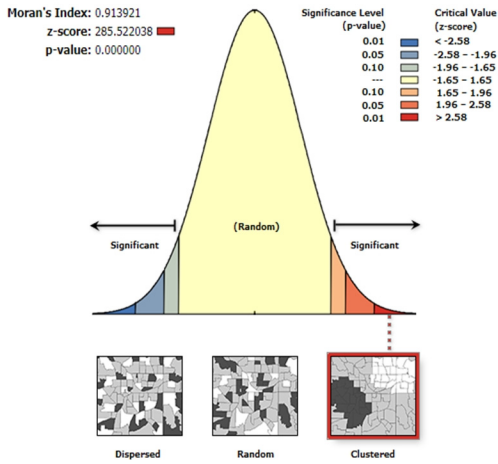


그림 9. 전역적 | 통계 분석 결과



그림 10. 국지적 | 통계 분석 결과

되었다(그림 10). 두 지역의 평균온도 값을 비교해보면, HH지역 약 32.63°C, LL지역 약 25.86°C로 두 지역 간 평균온도 값의 차이는 약 6.77°C로 크게 나타났다. HH지역은 도시기후구역 유형 중 저층건물 고밀지역과 포장된 도로에 분포하고 있어 이들 지역에 대한 열환경 개선 방안 마련이 필요한 반면, LL지역은 도시기후구역 유형 중 건물 사이 녹지, 화분식 녹지, 경작지로 열환경 개선에 녹지가 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

2. 연구지역 표면 온도 영향 요인 도출

연구지역에 대한 공간적 자기상관성 파악을 위한 국지적 I 통계 분석 결과, 표면 온도가 높은 값들끼리 군집되는 HH지역과 표면 온도가 낮은 값들끼리 군집되는 LL지역이 도면상에 표출되었다. HH지역은 도시기후구역

중 저층건물 고밀지역, 포장된 도로가 해당되는 것으로 나타났으며, LL지역은 도시기후구역 중 건물 사이 녹지, 화분식 녹지, 경작지 그리고 고층건물 고밀지역 일부가 해당되는 것으로 나타났다. 김동우 등(2019)의 연구에 따르면, 표면 온도는 촬영 대상의 색상, 재질, 그리고 형태 등에 따라 달라지는 태양 반사율에 영향을 받을 뿐만 아니라 시간의 흐름에 따라 주위에서 발생하는 그림자에도 영향을 받는다. 따라서 분석 결과 중 고층건물 고밀지역은 도시열섬현상의 발생 원인으로 HH지역에 해당되는 것이 일반적이나, 본 연구결과에서 LL지역에 해당되는 것으로 나타난 것은 촬영 당일 주변에서 발생한 그림자의 영향으로 인한 것으로 사료된다.

군집된 단위지역(HH/LL)에 따라 표면 온도에 영향을 미치는 요인을 도출하기 위해 UAV 광학 영상을 기반으로 태양 반사율과 그림자의 영향이 최소화될 수 있도록 다음과 같은 조건으로 시설물의 지붕을 분류하였다. 촬영 대상 시설물 중 표면이 평평하고 한 가지 재질로 구성되어 있으며, 그림자 영향이 적은 지붕을 대상으로 색상 및 재질에 따라 분류한 결과, 총 5개 유형으로 분류(파란색-패널, 회색-패널, 흰색-콘크리트, 회색-콘크리트, 초록색-콘크리트)되었다(그림 11). 표면 온도가 높게 분포하는 HH지역을 대상으로 5개 유형의 지붕에 따른 표면 온도를 분석하였다(표 6). 연구결과, 파란색-패널 지붕의



그림 11. 색상(재질)에 따른 시설물 지붕 분류

표 6. 지붕 색상(재질)에 따른 표면 온도

Color (material)	Roof surface temperature (°C)
Blue(panel)	33.67
Gray(panel)	32.49
Green(concrete)	32.28
White(concrete)	31.27
Gray(concrete)	31.16

표면 온도가 약 33.67°C로 가장 높게 나타났으며, 회색-패널 지붕 약 32.49°C, 초록색-콘크리트 지붕 약 32.28°C, 흰색-콘크리트 지붕 약 31.27°C, 회색-콘크리트 지붕 약 31.16°C 순으로 나타났다. 패널 지붕이 표면 온도가 콘크리트 지붕보다 높게 나타났는데, 그 이유는 패널은 금속 재질로 다른 재질의 지붕보다 열전도율이 높아 표면 온도가 민감하게 반응하기 때문이다(류택형 · 엄정섭, 2013). 지붕의 색상에 따라 실질적인 온도 저감 효과가 있는지를 파악하기 위해 재질이 같은 지붕 간에 표면 온도의 차이를 살펴보았다. 먼저 패널 지붕의 경우, 파란색 지붕과 회색 지붕 간 차이는 약 1.18°C로 나타났다. 콘크리트 지붕의 경우, 초록색 지붕과 흰색 지붕 간 차이는 약 1.01°C, 초록색 지붕과 회색 지붕 간 차이는 약 1.12°C, 흰색 지붕과 회색 지붕 간 차이는 약 0.11°C로 나타났다.

도출된 L지역의 특징 중 하나로 녹지가 표면 온도를 상대적으로 낮추어주는 효과가 있는 것으로 나타났다. 녹지의 영향이 주변지역에도 미치는지를 알아보기 위해 주변에 녹지가 있는 지붕과 주변에 녹지가 없는 지붕의 표면 온도 값을 분석하여 비교해보았다(표 7). 5개 유형 중 비교가 가능한 파란색-패널 지붕과 회색-콘크리트 지붕을 대상으로 분석한 결과, 파란색-패널 지붕의 경우, 녹지 주변에 분포한 지붕의 표면 온도는 약 28.95°C이고, 주변에 녹지가 없는 지붕은 약 33.67°C로 나타났다. 회색-콘크리트 지붕의 경우, 녹지 주변에 분포한 지붕의

표면 온도는 약 28.90°C이고, 주변에 녹지가 없는 지붕은 약 31.16°C로 나타났다. 주변에 녹지가 있는 경우와 주변에 녹지가 없는 경우의 표면 온도 차이는 파란색-패널 지붕 약 4.72°C, 회색-콘크리트 지붕 약 2.26°C로 녹지가 주변 시설물의 표면 온도까지 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 추후 다양한 유형의 녹지를 대상으로 표면 온도를 측정하여 녹지가 표면 온도에 영향을 미치는 반경을 파악한다면, 밀집 주거지 내 표면 온도가 높은 도로, 저층건물 고밀지역 주변의 녹지 조성 규모, 간격 등을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

현재 연구지역인 봉산마을에서 시행되고 있는 도시재생 뉴딜사업 '베리베리 굿 봉산마을 복덕방'(그림 12)에서 주거지원사업의 세부사업 중 집수리(주택외부) 지원사업, 기타 노후·불량 건축물 정비사업 시, 표면 온도를 상대적으로 낮출 수 있도록 시설물의 지붕의 색상 및 재질을 선택하는 과정에서 본 연구의 결과가 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 지역특성화사업의 세부사업 중 스마트농장 조성과 기초생활인프라사업의 세부사

표 7. 녹지 주변 지붕과 그렇지 않은 지붕의 표면 온도

Color (material)	Roof surface temperature (°C)	
	green area	not green area
Blue(panel)	28.95	33.67
Gray(concrete)	28.90	31.16

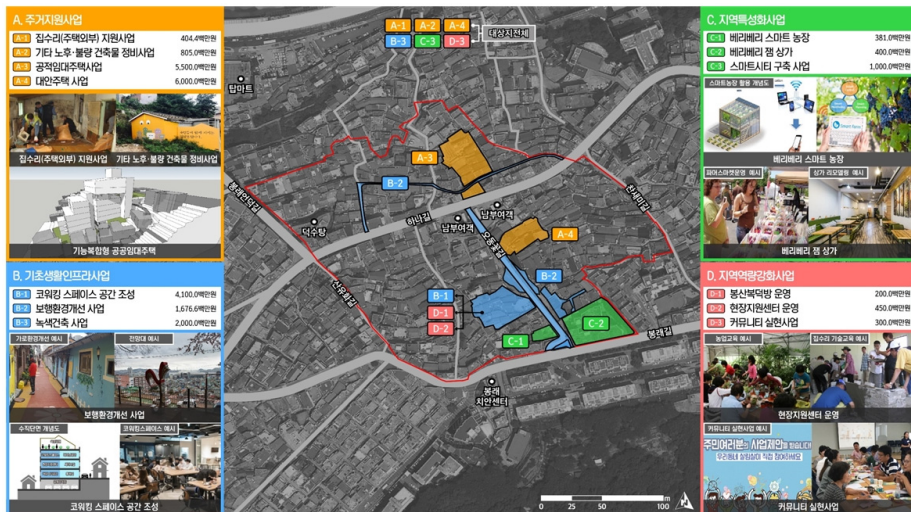


그림 12. 연구지역 도시재생 뉴딜사업 세부 내용

출처 : 오피니언뉴스, 2018년 8월 2일자.

업 중 녹색건축사업 시, 도시열섬현상을 완화시켜줄 수 있는 녹지 확보를 통해 표면 온도 저감 효과를 가져 온다면, 폭염 시 보다 효과적으로 대응할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론 및 시사점

본 연구에서는 현재 도시재생 뉴딜사업이 시행되고 있는 부산 영도구 봉산마을을 대상으로 UAV 기반의 열적 카메라를 활용하여 도시 열환경을 분석하고 대상지 세부 유형별 폭염 영향 요인을 파악하여 폭염 영향을 최소화할 수 있는 도시재생 대응방안을 제시하고자 하였다.

도시기후구역 유형별 표면 온도를 분석한 결과, 저층 건물 고밀지역과 포장된 도로의 표면 온도 평균값과 최대값이 모두 높게 나타나 우선적으로 열환경 개선이 필요한 구역임을 확인하였다. 세분류 토지피복 유형별 표면 온도 분석 결과, 도로, 교육·행정시설, 상업·업무시설, 단독주거지역, 기타 나지, 경지정리가 안 된 밭, 공동주거지역, 기타초지 순으로 표면 온도가 높게 나타났다. 하지만 연구지역 내 단독주거지역이 너무 광범위하게 분포하고 있으며, 촬영 당일 발생한 그림자의 영향으로 정확하고 구체적인 결과를 도출하는데 한계가 있음을 확인하였다.

연구지역의 표면 온도 값의 분포가 공간적으로 자기상관성을 가지는지, 즉 유사한 값들이 군집하는 경향을 보이는지를 파악하기 위해 공간적 자기상관성 분석을 시행하였다. 전역적 I 통계량 분석 결과, 표면 온도 값이 정적인 공간상관을 가지는 것으로 나타났으며, 국지적 I 통계량 분석 결과, 표면 온도가 높은 값이 군집하는 지역(HH지역) 혹은 낮은 값이 군집하는 지역(LL지역)의 분포를 파악할 수 있었다.

HH지역에 해당하는 도시기후구역은 저층건물 고밀지역과 포장된 도로로 나타났으며, 도시열섬현상의 발생원인인 고층건물 고밀지역이 LL지역으로 나타난 이유는 촬영 당일 주변 그림자의 영향인 것으로 사료된다. 보다 다양한 시기의 열적외 영상상을 구축한다면, 시설물의 고도 및 지붕의 형태 등에 의해 생성되는 그림자와 표면 온도 저감 효과를 구분하여 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 두 지역 간 평균온도 값의 차는 약 6.77°C로

차이가 크게 나타남을 알 수 있었다. HH지역 내 표면 온도에 영향을 미치는 요인을 도출하기 위해 시설물의 지붕을 색상 및 재질에 따라 분류하여 표면 온도를 분석하였다. 그 결과, 패널 지붕의 표면 온도가 높게 나타났는데, 이는 금속재질로 콘크리트 지붕보다 열전도율이 높기 때문에 판단된다. 지붕의 색상에 따라 실질적인 온도 저감 효과가 있는지를 파악하기 위해 재질이 같은 지붕 간에 표면 온도의 차이를 살펴보았다. 패널 지붕의 경우, 파란색·회색 지붕 간 차이는 약 1.18°C로 나타났다. 콘크리트 지붕의 경우, 초록색·흰색 지붕 간 차이는 약 1.01°C, 초록색·회색 지붕 간 차이는 약 1.12°C, 흰색·회색 지붕 간 차이는 약 0.11°C로 나타났다. 이것으로 보아 흰색, 회색 지붕이 파란색, 초록색 지붕에 비해 표면 온도가 평균적으로 약 1°C 낮게 나타나 열환경 개선에 효과가 있는 것으로 나타났다. 하지만 한 시점에서의 결과로 일반화하기는 어려우므로 보다 다양한 시기의 열적외 영상상을 구축을 통해 색상별 지붕의 표면 온도 변화를 면밀하게 파악한다면 객관성을 가질 수 있을 것이라 판단된다. LL지역에 해당하는 도시기후구역은 건물 사이 녹지, 화분식 녹지, 경작지로 나타났으며, 공통적으로 녹지가 분포해있다. 녹지는 표면 온도를 상대적으로 낮추어주는 효과가 있는데 녹지의 주변지역에도 이러한 긍정적인 영향을 미치는지를 알아보기 위해 같은 색상 및 재질의 지붕을 대상으로 주변에 녹지가 있는 지붕과 주변에 녹지가 없는 지붕의 표면 온도 값을 분석해보았다. 그 결과, 파란색·패널 지붕의 표면 온도 차는 약 4.72°C, 회색·콘크리트 지붕의 표면 온도 차는 약 2.26°C로 모두 주변에 녹지가 없는 지붕의 표면 온도가 높게 나타났으며, 녹지가 주변 시설물까지 표면 온도 저감 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이러한 연구 결과는 연구지역인 봉산마을에서 시행되고 있는 도시재생 뉴딜사업 중 주거지원사업 시, 표면온도를 상대적으로 낮출 수 있도록 시설물 지붕의 색상 및 재질을 선택하는 과정에서 본 연구의 결과가 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 지역특성화사업과 기초생활인프라사업 시, 도시열섬현상을 완화시켜줄 수 있는 녹지를 적극적으로 반영하여 주변 표면온도 저감 효과를 창출해 낸다면, 향후 폭염 시 효과적으로 대응할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 국토교통부에서 제공하는 '도시재생 뉴딜사업 가이드라인'에서는 재난으로 화재를 다루고 있는데(국토교통부, 2019), 도시재생사업 대상지는 여러 재난에 취

약한 환경에 노출되어 있기 때문에 폭염, 폭우, 홍수 등 재난의 폭을 넓혀 가이드라인을 제시한다면, 기후변화에 대응할 수 있는 도시재생계획을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 기후변화 동인인 폭염에 대응 가능한 도시재생 방안을 마련하고자 연구지역의 열화상지도를 구축하여 폭염으로 인한 영향을 많이 받는 지역을 파악할 수 있었다. 하지만 한 시기의 열적의 영상을 가지고 판단하기에는 한계가 있으며, 열적의 카메라 오류, 그림자 등 정확한 표면 온도를 측정하는 데 제약이 되는 요인이 있을 수 있다. 또한 연구지역을 세분류 토지피복 유형별로 표면 온도를 분석하기에는 단독주거지역이 너무 광범위하므로 표면 온도에 영향을 미치는 세부적인 요인 도출에 제한적인 부분이 있다. 추후 연구에서는 시계열별로 열적의 정사영상 수집 및 분석을 통해 카메라 오류, 그림자 등 제약이 되는 요인들을 제거하고 대기온도와 습도, 촬영 대상의 방사율을 고려하여 열적의 카메라 데이터의 검보정을 실시한다면 보다 정확한 열화상지도를 구축할 수 있을 것이며, 나아가 폭염에 취약한 지역 및 시설물별 냉방 부하를 예측하고 개선하는 데 일조할 수 있을 것이다.

참고문헌

국토교통부, 2019, 「도시재생 뉴딜사업 활성화계획 수립 및 사업시행 가이드라인」.

권용석, 2018, “스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할” 기상기술정책, 11(1), 44-53.

기상청, 2019, 「2018년 이상기후 보고서」, 서울: 기상청.

김권·엄정희, 2017, “WUDAPT Protocol을 활용한 Local Climate Zone 분류: 서울특별시 사례로” 한국조경학회지, 45(4), 131-142.

김동우·박종철·장동호, 2017, “표준강수지수와 정규식생지수를 활용한 봄 가뭄 탐지 가능성 분석” 한국지리학회지, 6(2), 165-174.

김동우·유재진·윤정호·손승우, 2019, “UAV 열적의 카메라를 활용한 폭염 시 시가지의 표면 온도 변화 분석” 한국지리학회지, 8(1), 46-60.

김진복·김세용, 2015, “「도시재생특별법」에서 기후변화 대응 전략 반영의 필요성” 한국주거학회 2015 추계학술

발표대회 논문집, 27(2), 141-145.

류택형·엄정섭, 2013, “원격 열화상을 이용한 지반색상별 겨울철 표면 온도 변화추세 비교 평가” 한국지형공간정보학회지, 21(1), 27-37.

박샘·최광용, 2016, “위성영상에 탐지된 1980년대 이후 수도권 지역의 도시 팽창” 한국지리학회지, 5(3), 331-343.

서보용·정응호, 2017, “도시 열환경개선을 위한 공간지형적 특성에 따른 바람길 유동 비교 분석” 한국지리정보학회지, 20(2), 75-88.

서태성·심우배·왕광익·임상연·양민선, 2008, 「기후변화 대응 국토공간계획 평가 및 과제: 기후변화에 따른 국토여건 전망과 국토·도시 분야의 추진과제」, 세종: 국토해양부.

손승우·유재진·전형진·임성하·강영은·윤정호, 2017, “UAS 기반 대형 폐기물 발생량 측정 기능성 모색” 대한원격탐사학회지, 33(5), 809-820.

안지숙·황재동·박명희·서영상, 2012, “Landsat-7 ETM+ 영상과 AWS 자료를 이용한 부산의 토지피복에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 산출” 한국지리정보학회지, 15(4), 65-77.

오규식·홍재주, 2005, “도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구” 한국도시설계학회지 도시설계, 6(1), 47-63.

왕광익·이범현·정윤희·이진희·유선철·노경식·민경주·하태훈, 2013, 「기후변화 대응 도시재생 정책과제 및 계획수립 방안 연구」, 안양: 국토연구원.

왕광익·이영아·김명수·심우배·유선철·박정은, 2009, 「기후변화에 대비한 도시계획적 대응방안 연구」, 과천: 국토해양부.

왕광익·정윤희·이진희·박근현, 2012, 「기후변화 취약계층을 위한 녹색도시정책 연구」, 안양: 국토연구원.

유선철·여관현, 2015, “기후변화에 대응한 도시재생 지표개발 및 활성화지역 선정 연구: 서울특별시 사례를 중심으로” 도시행정학보, 28(4), 77-99.

이경주·황명화·한선희·양은정, 2015, 「공간통계 분석의 이해와 활용을 위한 첫걸음」, 안양: 국토연구원.

하종식·정휘철·이정호·김동현·최지혜, 2014, 「기후변화 폭염 대응을 위한 중장기적 적응대책 수립 연구」, 서울: 한국환경정책·평가연구원.

Coveney, S. and Roberts, K., 2017, Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for envir-

- onmental applications: Data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling, *International Journal of Remote Sensing: Unmanned Aerial Vehicles for Environmental Applications*, 38(8-10), 3159-3180.
- Gaitani, N., Burud, I., Thiis, T., and Santamouris, M., 2017, High-resolution spectral mapping of urban thermal properties with unmanned aerial vehicles, *Building and Environment*, 121, 215-224.
- IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report*, Geneva: IPCC.
- Stewart, I.D. and Oke, T.R., 2012, Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Webster, C., Westoby, M., Rutter, N., and Jonas, T., 2018, Three-dimensional thermal characterization of forest canopies using UAV photogrammetry, *Remote Sensing of Environment*, 209, 835-847.
- 연합뉴스, 2019년 9월 2일자, “고양시, 내달 22~23일 킨텍스에서 ‘2019 고양도시포럼’”
- 오피니언뉴스, 2018년 8월 2일자, “전국 51곳에서 도시재생 뉴딜 시범사업, 8월 착수”
- 위클리오늘, 2019년 12월 19일자, “김해시, 기후변화 적응 우수 지자체 선정”
- 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr>
- 기상청 날씨누리, <http://www.weather.go.kr>
- 교신 : 강영은, 48733, 부산광역시 동구 중앙대로 226번길 3-8, 9F, (주)싸이트플래닝건축사사무소(이메일: jiyoon8936@gmail.com)
- Correspondence : Youngeun Kang, 48733, 9F, 3-8 Jungang-daero 226beon-gil, Dong-gu, Busan, Korea, Siteplanning Co., Ltd. (Email: jiyoon8936@gmail.com)
- 투고접수일: 2020년 3월 23일**
심사완료일: 2020년 4월 1일
게재확정일: 2020년 4월 6일

