

UAV 열적외 카메라를 활용한 폭염 시 시가지의 표면온도 변화 분석*

김동우** · 유재진*** · 윤정호**** · 손승우*****

Analysis of Urban Surface Temperature Change during Heat Wave Using UAV Thermal Infrared Camera*

Dongwoo Kim** · Jae Jin Yu*** · Jeong ho Yoon**** · Seung Woo Son*****

요약 : 본 연구에서는 폭염 시 시가지의 표면온도 변화를 분석하기 위해 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 기반의 열적외 카메라로 시기별 정사영상을 구축하였으며 정사영상별 차연산을 통해 지점별 표면온도 변화를 분석하고 토지피복 유형별로도 표면온도를 변화를 분석하였다. 연구결과, 오전에서 오후로 갈수록 건물 등의 인공시설, 도로, 나지, 밭, 식생 순서로 표면온도 상승폭이 높게 나타났다. 또한 태양고도에 따른 그림자의 영향으로 인해 표면온도가 하강하는 지점을 파악할 수 있었으며 시설물의 옥상 재질과 색상에 따라 표면온도 변화가 다르게 나타나는 경향을 확인하였다. 본 연구의 결과는 고해상도 열적외 영상을 기반으로 시가지 내의 토지이용 및 시설물에 따른 표면온도 변화를 분석하기 위한 연구로서 의의가 있다.

주요어 : UAV(Unmanned Aerial Vehicle), 열적외 카메라, 폭염, 표면온도

Abstract : In this study, we analyze the surface temperature change in the urban during the heatwave, we constructed a time-series orthomosaic image with thermal infrared camera based on UAV (Unmanned Aerial Vehicle), and analyzed the surface temperature change by the difference calculation by orthomosaic image. As a result, from the morning to the afternoon, the increase in surface temperature was found to be higher in the order of artificial facilities such as buildings, roads, barrens, fields, and vegetations. Also, it was found that the surface temperature was lowered due to the influence of the shadow due to the sun altitude, and the surface temperature change was also different depending on the material and color of the facility of roof. The results of this study are meaningful as a study to analyze the surface temperature changes according to the land use and building in the urban surface based on the high resolution thermal image.

Key Words : UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Thermal infrared camera, Heat wave, Surface temperature

I. 서론

최근 기후변화에 의한 폭염의 발생빈도가 증가하고 있다. 기상청에서는 일 최고기온이 각각 33°C와 35°C 이

상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 폭염주의보와 폭염경보를 발효하고 있으며 2018년 6월부터 9월까지 기록된 전국 평균 폭염일수는 약 31일로 1994년 이래 가장 많았다(기상자료개발포털). 기후변동에 관한

*본 연구는 환경부의 환경정책기반공공기술개발사업(과제번호: 2016000200009)에서 지원받아 한국환경정책·평가연구원에서 수행하였음.

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

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

****한국환경정책·평가연구원 선임연구위원(Senior Research Fellow, Korea Environment Institute, jhyoon@kei.re.kr)

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

정부 간 패널인 제5차 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC) 보고서에서는 21세기 동안 전 세계적으로 지구온난화가 가속화 될 것으로 전망하고 있으며 인간의 활동이 가장 활발한 도시 지역에서 발생하는 폭염의 위험 가능성 또한 증가할 것으로 예상하고 있다.

이러한 도시 지역의 폭염을 가속화 시키는 요인 중 하나로 도시열섬현상이 지목되고 있다(권용석, 2018). 도시열섬현상은 도시의 기온의 교외지역이 비해 온도가 높게 나타나는 현상으로 아스팔트 도로, 간판, 창문 등의 인공구조물에서 발생하는 복사열과 냉방 및 난방기의 배출열, 고층건물 밀집에 의한 공기순환 저하, 그리고 녹지면적 감소 등이 발생 원인으로 지목되고 있다(오규식 · 홍재주, 2005; 안지숙 등, 2012; 서보용 · 정응호, 2017).

도시의 표면온도를 분석하기 위한 방법으로는 지상에 설치된 기상 관측 장비에서 측정된 자료를 기반으로 한 연구가 활발히 수행되었다. 하지만 기상 관측 장비가 설치된 지점은 고정되어 있으며 분포가 균일하지 않다는 단점이 있다. 위성영상은 주기적으로 넓은 지역을 대상으로 영상 수집이 가능하다는 장점이 있으며 도시지역의 팽창 분석(박샘 · 최광용, 2016), 가뭄지역 식생 모니터링(김동우 등, 2017) 등 도시와 폭염 및 가뭄에 관련한 연구에 활용되고 있다. 특히 위성의 열적외 센서는 온도에 민감한 복사적 특성을 가지고 있어 표면온도의 시계열적 변화 분석 연구에 효과적인 것으로 알려져 있다(김근희 등, 2018). 열적외 영상을 제공하는 위성영상은 Landsat 7, 8, 그리고 MODIS 등이 있으며, 최근 국내에서는 Landsat 8 영상을 활용하여 지표면 온도를 산출하고 분석하는 연구가 진행되었다(지준범 등, 2016; 김태현 등, 2018). 하지만 위성영상은 구름 등의 기상조건에 영향을 받으며 촬영시기가 한정되어 있어 원하는 시기의 자료를 얻기 어렵고 공간 해상도가 낮아 다양한 토지피복 특성이 나타나는 도시의 표면온도를 측정하기에는 한계점이 있다.

최근 UAV(Unmanned Aerial Vehicle, 이하 UAV)와 열적외 카메라를 활용하여 지표면의 온도를 측정하는 기술이 보급되면서 이를 활용하여 온도를 측정하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Nishar *et al.*, 2016; Gaitani *et al.*, 2017). UAV 또한 바람, 강수 등의 영향을 받지만 위성영상보다 비교적 원하는 시기에 비행을 통해 영상

을 획득할 수 있으며 고해상도 영상 촬영이 가능하다는 장점이 있다. 국내에서는 태양광 발전소를 모니터링 하거나(이근상 · 이종조, 2017) 저수지의 누수 진단에 활용되었다(유영철 등, 2016). 도시 내 녹지의 표면온도를 분석하기 위한 연구(최태영 등, 2017)도 진행되었지만, 인공밀집도가 높은 시가지의 표면온도를 분석하는데 UAV와 열적외 카메라를 활용한 연구는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 UAV와 열적외 카메라를 기반으로 여름철 폭염 시 오전과 정오, 그리고 오후에 시가지 표면온도 분포지도를 구축하여 시계열적으로 표면온도 변화를 분석을 실시하고자 하였다. 또한 위성영상 열적외 영상과 비교를 통해 UAV 열적외 카메라 촬영의 시가지 표면온도 분석 활용성을 모색하였다.

II. 연구지역과 연구방법

1. 연구지역

연구지역은 세종특별자치시 금남면 용포리 일대이다. 세종특별시 개발 이전에 형성된 원도심지이며 건물 대부분의 층수가 2~3층으로 나타나 UAV 비행 및 촬영에 적합한 대상지로 판단되어 연구 대상지로 선정하였다. 동쪽과 서쪽의 산지의 고도는 약 50~60m로 식생이 형성되어 있으며 북쪽부터 남쪽까지 고도 30~40m의 저지대에 시가지가 발달되어 있다. 시가지는 대평시장을 중심으로 주거시설과 상업시설이 격자형으로 배치되어 있다. 대평시장 내 도로 상부에는 아케이드 지붕이 설치되어 있으며 이는 주변 건물과 연결되어 있다. UAV 영상 촬영의 주요대상은 대평시장을 중심으로 약 43,000m² 면적의 시가지이며 토지피복 유형별로 표면온도 변화를 분석하기 위해 소규모 밭과 나지, 그리고 식생을 포함하여 촬영하였다. 좌표는 36°28'00"N~127°16'55"E이다 (그림 1).

2. 연구방법

본 연구는 여름철 폭염이 발생하였을 때 시가지에서 발생하는 표면온도 변화를 분석하기 위해 UAV 기반 영상 촬영을 실시하였다. 먼저 UAV 영상 촬영 전에 지상 기준점(Ground Control Points, 이하 GCP)을 설치하여

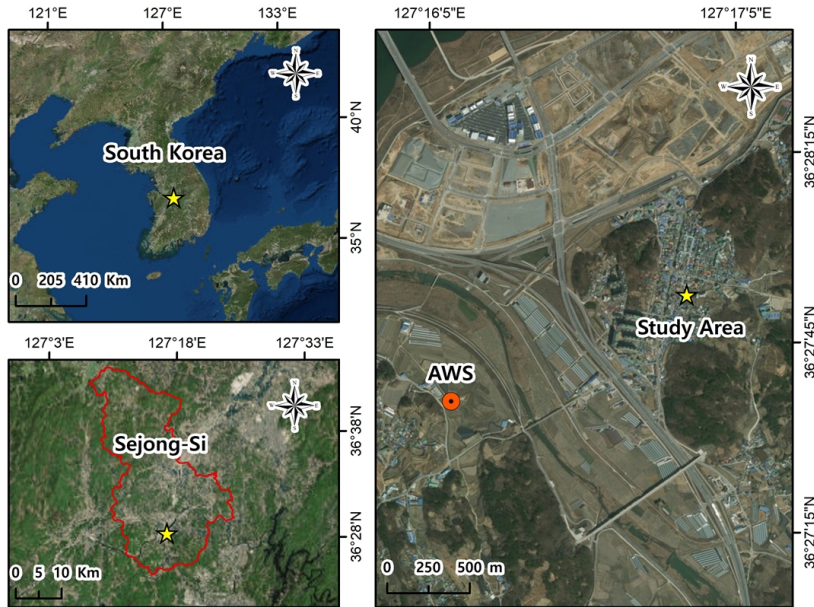


그림 1. 연구지역

* ArcGIS Online basemap(World Imagery)을 활용.

영상의 위치정확도를 확보하고자 하였다. UAV 열적외 영상 촬영은 2018년 폭염 경보가 발령된 8월 10일에 실시하였다. 오전 8시 30분과 태양이 남중고도에 오는 시각인 12시 39분, 그리고 오후 3시에 걸쳐 총 3회 실시하였다. 또한 열적외 카메라 촬영 시기마다 휴대용 표면온도 측정기를 통해 표면온도를 측정하여 UAV 열적외 영상에서 추출한 표면온도 값과 비교하였다. 연구지역의 고해상도 항공사진을 구축하고 토지피복도 작성을 위한 UAV 광학 영상 촬영은 2018년 8월 10일의 오전 8시 30분과 2018년 8월 22일 각각 1회 실시하였다. 수집한 열적외 영상과 광학 영상은 촬영 시기별로 정사영상을 구축하였다. 8월 10일 구축된 3개의 열적외 정사영상을 차연산하여 표면온도 변화 분포를 확인하고 토지피복 유형별로 표면온도 변화 분석을 실시하였다. 토지피복 유형은 환경부에서 제공하는 세분류 토지피복도를 기반으로 광학 정사영상과 현장조사를 통해 재분류하였다. 추가적으로 기존 표면온도 측정 방법과의 비교를 위해 연구지역 상공에 Landsat 8이 지나가는 시간인 8월 22일 오전 11시에 UAV 영상 촬영을 실시하여 공간분석을 실시하였다.

1) UAV 정사영상 및 토지피복도 구축을 위한 현장조사

시가지 표면온도 변화 분석을 위해 2018년 8월 10일 UAV 기반의 영상 촬영을 실시하였고 Landsat 8 위성영상과의 비교를 위해 2018년 8월 22일에 추가 촬영을 실시하였다. 8월 10일의 기온은 오전 8시의 약 28.2°C에서 오후 3시 약 35°C까지 상승하였으며 오전 11시에 폭염경보가 발령되었다. 풍속은 약 3m/s 이하로 UAV 비행에 적합하였다. 8월 22일은 기온이 오전 8시 약 26.5°C에서 오후 3시 36.7°C까지 상승하였으며 풍속은 약 4m/s 이하로 나타났다. 기상정보는 연구지역 인근의 세종금남 방재기상관측장비(Automatic Weather System, 이하 AWS)에서 측정된 것이다.

UAV 열적외 영상 촬영에는 DJI社의 회전익 UAV인 M600과 열적외 카메라인 Zenmuse XT를 사용하였다. M600의 기체 무게는 9.6kg, 적재 무게 없이 최대 비행시간은 약 40분, 최대속도는 18m/s이다. Zenmuse XT의 스펙트럼 밴드는 7.5~13.5 μ m으로 영상의 크기는 고해상도 기준으로 640×512 pixel이며 온도측정 범위는 -25~135°C이다. UAV 광학 영상 촬영에는 DJI Mavic pro와 자체 광학 카메라를 활용하였다. Mavic pro의 기체 무게

표 1. UAV와 카메라의 상세정보

| UAV | | |
|----------------------|-------------------|--------------------------|
| Model | M600 | Mavic Pro |
| Weight | 9.6kg | 734g |
| Maximum flight time | 40 minutes | 27 minutes |
| Maximum flight speed | 18m/s | 18m/s |
| Camera | | |
| Model | Zenmuse-XT | Mavic Pro 1/2.3" CMOS |
| Image size | 640 × 512 (pixel) | 4000 × 3000 (pixel) |
| Spectral Band | 7.5~13.5 μ m | RGB |
| Scene range | -25° to 135°C | - |

는 734g, 최대 비행시간은 약 27분, 최대속도는 18m/s이다. 광학 카메라는 1/2.3" CMOS 센서를 탑재하고 있으며 영상의 크기는 4000×3000 pixel이다. 연구에서 활용한 장비의 자세한 사양은 표 1과 같다.

(1) 지상기준점(GCP:Ground Control Points) 설정

본 연구에서 활용한 UAV에는 GPS(Global Positioning System)가 부착되어 있지만 촬영한 영상 기반으로 구축

한 정사영상의 위치정확도를 높이기 위해서는 GCP를 설정하여 취득된 좌표를 반영하여야 한다. GCP의 개수는 지표면의 면적과 고저차 등에 따라 개수를 정할 수 있으며 연구지역 면적의 20,000m²당 1개의 GCP를 설정할 시 비교적 높은 정확도가 나타나는 것으로 알려져 있다(손승우 등, 2017; Coveney and Roberts, 2017). 연구지역 내 중심에는 건물이 분포하기 있기 때문에 접근이 용이한 도로와 외곽의 나지를 중심으로 9개 지점을 선정하여 GCP 측량 순서별로 번호를 설정하였다(그림 2). GCP는 80×80cm의 대공표지를 사용하였다. GCP 측량을 위한 GNSS(Global Network Satellite System)는 Trimble사의 R8s를 사용하였다.

(2) UAV 기반 열적외 영상 및 광학 영상 촬영

연구지역의 열적외 영상 촬영은 2018년 8월 10일과 8월 22일에 실시하였다. 8월 10일에는 오전 8시 30분과 당일 태양이 남중하는 시각이었던 12시 39분, 그리고 오후 3시를 기점으로 20분간 비행 및 촬영을 실시하여 열적외 영상을 수집하였다. 촬영시기별로 이후의 본문에서는 오전과 남중고도 시각, 오후로 표기하였다. 8월 22일에는 Landsat 8 위성의 촬영시점인 오전 11시에 비행

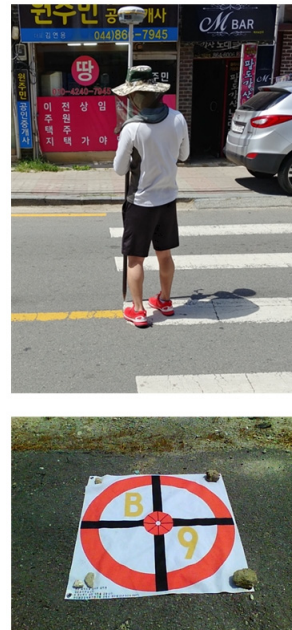
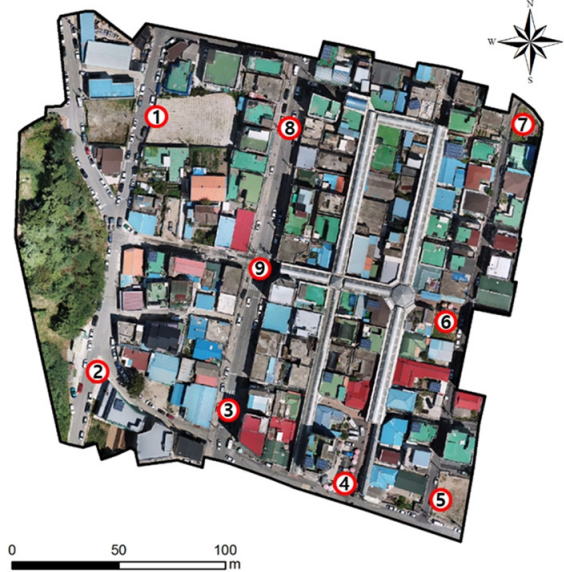


그림 2. R8s를 이용한 GCP 좌표 측량과 GCP의 위치

* ArcMap 10.1을 활용(좌).

및 촬영을 실시하였다.

UAV의 비행 변수(비행고도, 촬영 이미지 중복도 등)를 어떻게 설정하느냐에 따라 영상의 정합과정과 공간 해상도에 영향을 준다. 본 연구에서의 UAV 열적외 영상 촬영 시 비행변수는 영상의 공간해상도와 안전한 UAV 비행 가능 시간을 고려하여 비행고도는 50m, 촬영 이미지 중복도는 80%로 설정하였다. UAV 비행 및 촬영에는 Pix4d capture 어플리케이션을 활용하였다. 비행 결과 8월 10일 오전과 남중고도 시각 그리고 오후에 각각 447개, 358개, 426개의 영상이 촬영되었으며, 8월 22일 오전 11시에는 448개의 영상을 수집하였다. 8월 10일 남중고도 시각의 열적외 영상 촬영에서 수집된 영상의 개수는 다른 시점 약 70개 적었으며 다른 시점보다 촬영된 면적이 적었다. 이는 활용한 열적외 카메라나 촬영 어플리케이션의 오류로 예상되며, 해당시점에 촬영된 대상 및 면적을 기준으로 표면온도 변화 분석을 실시할 연구지역을 설정하였다.

연구지역의 광학 영상 촬영은 2018년 8월 10일 오전 8시 30분과 2018년 8월 22일 오전 11시에 각각 1회 실시하였다. 광학 영상은 열적외 영상보다 촬영 중복도가 낮아도 영상간의 이미지 매칭이 유리하기 때문에 비행변수를 비행고도 70m, 촬영 이미지 중복도 70%로 설정하였다. 이를 통해 전체 UAV 비행 및 촬영 시간을 단축하고 효율성을 높이고자 하였다. 수집된 광학 영상의 개수는 463개이다.

(3) 휴대용 표면온도 측정기

휴대용 표면온도 측정기인 FLIR社의 E8을 사용하여 UAV 기반 열적외 영상에서 측정된 표면온도와 비교 분석을 실시하였다. E8은 온도 측정 범위는 -20~250°C, 열감도는 <math>0.06^{\circ}\text{C}/60mK(열감도(Thermal sensitivity), 잡음 등가온도 차(Noise Equivalent Temperature Difference))이며 측정 대상과의 최소 측정거리는 0.5m이다. 표면온도 측정은 1번 GCP(그림 2)와 인근 나지를 대상으로 실시하였으며 대상과의 약 0.5m 떨어진 지점에서 UAV가 1번 GCP의 상공을 지나가는 시간에 3회 측정하여 평균값을 계산하였다.

2) UAV 정사영상 구축

UAV 기반으로 촬영한 열적외 영상과 광학 영상은 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 알고리즘과 SfM

표 2. 정사영상별 상세정보

| Thermal Infrared Image Orthomosaics | |
|-------------------------------------|--------------------|
| Model | Spatial Resolution |
| 2018. 08. 10 AM 08:30 | 6cm |
| 2018. 08. 10 PM 12:39 | 6cm |
| 2018. 08. 10 PM 15:00 | 6cm |
| 2018. 08. 22 AM 11:00 | 6cm |
| 광학 Image Orthomosaics | |
| Model | Spatial Resolution |
| 2018. 08. 10 AM 08:30 | 2cm |
| 2018. 08. 10 AM 11:04 | 2cm |

(Structure from Motion) 알고리즘을 기반으로 정사영상으로 구축하였다. SIFT 알고리즘은 인접한 영상 사이에서 동일한 특징구조를 찾아 영상을 정합하는 기술이며, SfM 알고리즘은 다양한 위치에서 촬영된 2차원 영상을 촬영한 카메라의 위치와 방향을 재구성하여 촬영된 객체나 장면을 3차원으로 구현하는 기술이다(유재진 등, 2018). 정사영상 구축에는 스위스 Pix4D社의 Pix4DMapper 4.3 소프트웨어를 활용하였으며 GCP 좌표를 삽입하여 절대표정하였다. 열적외 영상은 8월 10일 3개 시기, 8월 22일은 1개 시기를 기반으로 정사영상을 구축하였으며 광학 영상은 8월 10일과 22일 각각 1개의 정사영상을 구축하였다. 정사영상은 Korea 2000/Central Belt 2010 (EPSG:5186)좌표계로 제작되었으며 시기별 세부적인 내용은 표 2와 같다.

3) 토지피복도 구축

연구지역의 토지피복도는 환경부에서 제공하는 2015년 세종시 세분류 토지피복도를 기반으로 하였으며 2018년 8월 10일에 촬영한 UAV 광학 영상으로 구축된 정사영상과 현장조사를 반영하여 토지피복 유형을 재분류 하였다. 연구지역의 세분류 토지피복도 유형은 9개로 도로, 공동주거시설, 단독주거시설, 기타 공공시설, 상업·업무시설, 기타나지, 밭, 혼효림 그리고 활엽수림으로 나타났다. 기존의 도로와 시설물로 분류되어 있던 대평시장 상단의 아케이드 지붕을 추가적으로 분류하여 총 10개의 토지피복 유형으로 설정하였다.

4) 표면온도 변화 분석

2018년 8월 10일 오전과 남중고도 시각, 그리고 오후

에 촬영하여 구축한 세 시기의 표면온도 정사영상을 바탕으로 연구지역에서 발생한 표면온도 변화를 분석하였다. 표면온도 변화 분석은 시기별로 구축한 표면온도 정사영상의 중첩된 부분만을 대상으로 실시하였으며 먼저 인근 기상청 AWS에서 측정된 온도 값과 휴대용 표면온도 측정기에서 수집된 온도 값을 함께 비교하였다. 그 다음 표면온도 분포를 비율로 계산하여 표면온도 값의 분포를 분석하였고, 이중 최대 및 최소표면온도가 나타난 지점을 대상으로 표면온도 측정 오류 가능성을 검토해보았다.

또한 공간적 특성에 따른 표면온도 변화를 분석하기 위해 ArcMap 10.1의 zonal statistics 툴을 이용하여 토지피복 유형별 세 시기의 열적외 정사영상의 표면온도 값을 계산하였으며 시기별로 열적외 정사영상을 차연산하고 표면온도 변화 값을 지도화하여 토지피복 유형별 이외에 표면온도 변화에 영향을 주는 특성을 알아보고자 하였다.

5) Landsat 8 열적외 영상 수집 및 UAV 열적외 영상과의 비교

UAV 열적외 영상에서 추출된 연구지역의 표면온도 값과 기존 표면온도 측정방법을 비교하기 위해 8월 22일 오전 11시 UAV 열적외 영상 촬영을 실시하고 동시간대 촬영된 Landsat 8의 열적외 센서 영상을 활용하였다. Landsat 8은 NASA(National Aeronautics and Space Administration)와 USGS(United States Geological Survey)가 공동으로 개발하여 2013년에 발사된 극궤도 위성으로 16일을 주기로 같은 지역을 촬영하고 있다. 탑재된 센서는 OLI(Operational Land Imager)와 TIRS(Thermal Infrared Sensor)이며 OLI는 30m 공간해상도의 가시 및 근적외 채널인 1~9번 밴드를 제공하며 TIRS는 열적외 채널로 10번과 11번 밴드가 해당되는데, 본래 공간해상도인 100m에서 OLI 기준인 30m로 보간되어 제공된다. 각 밴드에는 정량화된 DN(Digital Number)값이 저장되어 있으며 밴드별 특성을 고려하여 복사에너지로 변환할 수 있다(USGS, 2018). 본 연구에서는 8월 22일 11시 4분 경에 촬영된 path115/row35 영역의 TIRS의 10번 밴드를 활용하였으며 일련의 과정을 통해 표면온도로 변환하였다. 먼저 USGS에서 제공하는 식 (1)을 바탕으로 복사에너지를 계산하였다.

표 3. NDVI 값 범위에 따른 방출률(ϵ)

| NDVI Ranges | Emissivity (ϵ) |
|-----------------------|---------------------------|
| NDVI < -0.185 | 0.995 |
| -0.185 ≤ NDVI < 0.157 | 0.970 |
| 0.157 ≤ NDVI ≤ 0.727 | 1.0094+0.047ln (NDVI) |
| NDVI > 0.727 | 0.990 |

$$L_{\lambda} = ML Q_{cal} + A_L \tag{1}$$

L_{λ} 은 센서에서 측정된 복사에너지이며 ML 과 A_L 은 해당 밴드 고유 상수 값이며 Q_{cal} 은 DN값을 의미하며 계산된 L_{λ} 와 식 (2)를 통해 밝기온도(T)를 산출하였다.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \tag{2}$$

T 는 밝기온도(K)이며 10번 밴드의 보정계수 K_1 과 K_2 는 각각 774.8853과 1321.0789이다. 밝기온도에서 표면온도를 계산하기 위해서는 방출률을 고려해야 하며 국립기상과학원(2016)에서 제안한 NDVI 값의 범위에 따른 방출률(표 3)을 바탕으로 표면온도를 계산하였다.

8월 22일의 UAV 열적외 영상 촬영은 8월 10일의 UAV 열적외 영상 촬영과 동일 비행변수인 비행고도 50m, 촬영중복도 80%로 진행하여 448개의 영상을 수집하였다. GCP는 8월 10일에 설치한 GCP와 동일한 위치에 설치하여 좌표값을 측정하였으며 일련의 과정을 통해 공간해상도 6cm 급의 정사영상을 구축하였다. 구축된 열적외 영상의 표면온도는 Landsat 8의 격자와 공간해상도인 30m를 기준으로 평균값을 계산하여 Landsat 8 동일 격자의 표면온도와 비교 분석하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 표면온도 변화 분석

연구지역의 표면온도 변화 분석을 위해 2018년 8월 10일 오전과 남중고도 시각 그리고 오후에 UAV 정사영상과 토지피복도를 구축하였으며(그림 3) 휴대용 표면온도 측정기를 통해 표면온도를 측정하였다.

먼저 열적외 정사영상과 휴대용 표면온도 측정기(FIIR

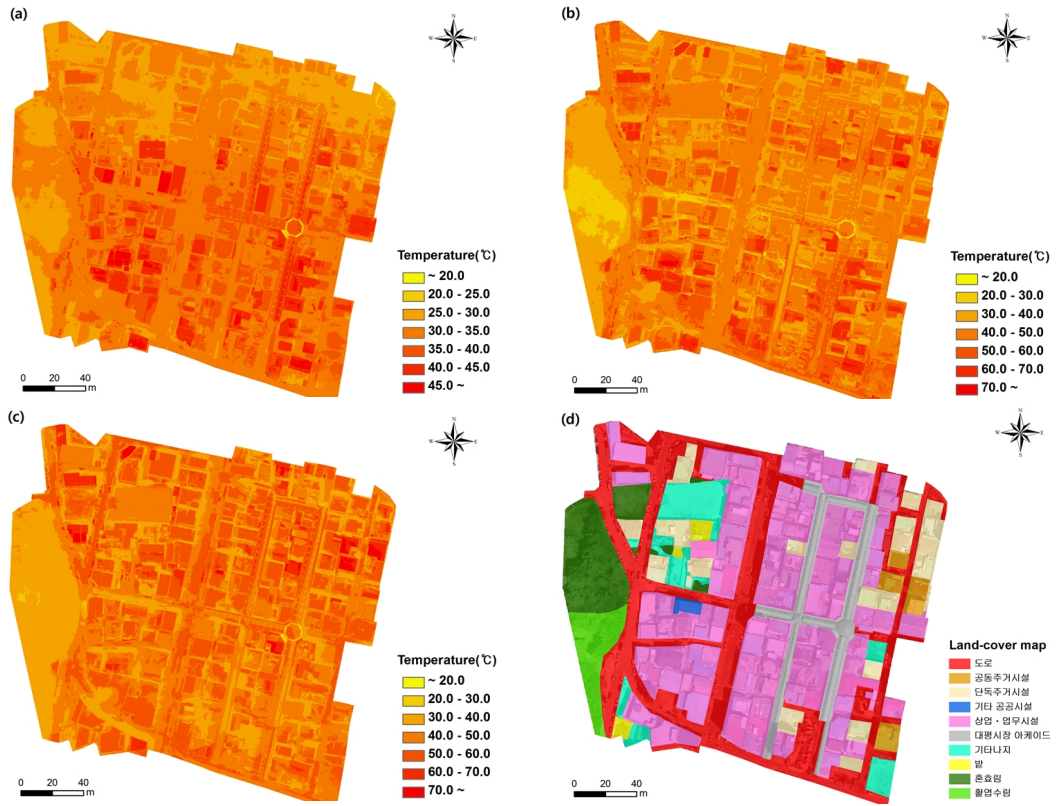


그림 3. 시기별 열적의 정사영상과 토지피복도

* (a)는 AM 08:30의 열적의 정사영상; (b)는 PM 12:39의 열적의 정사영상; (c)는 PM 15:00의 열적의 정사영상; (d)는 토지피복도.
 ** ArcMap 10.1을 활용.

표 4. UAV 열적의 정사영상과 FLIR E8의 표면온도 값과 AWS 온도 값

| Land-cover type | AM 08:30 Temperature (°C) | PM 12:39 Temperature (°C) | PM 15:00 Temperature (°C) |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| UAV 열적의 영상 | 33.5 | 44.6 | 44.4 |
| FLIR E8 | 34.6 | 43.3 | 45.4 |
| AWS(세종 급남) | 28.1 | 34.1 | 35.0 |

E8)의 표면온도 값 비교를 GCP 1번(그림 2)을 대상으로 실시하였다. 측정된 표면온도 값과 해당시간에 AWS에서 측정된 온도 값은 표 4와 같다. 시기별로 측정된 표면온도 값은 AWS 측정된 온도보다 약 6~10°C 씩 높은 것으로 나타났다. UAV 열적의 정사영상과 휴대용 측정기의 표면온도는 시기별로 약 1.0~1.3°C씩 차이가 발생하였으며 휴대용 표면온도 측정기에서 측정된 표면온도가 높은 것으로 나타났다. 오전에서 오후로 시간이 흐를수록 온도와 표면온도 값이 상승하는 유사한 경향이 나타났지만 한 지점을 대상으로만 온도비교를 실시하였기

때문에 추후에는 더 많은 지점을 대상으로 표면온도 값을 측정하고 비교할 필요가 있을 것으로 판단된다.

연구지역 전체의 표면온도 변화 분석은 먼저 표면온도의 최고기온과 최저기온을 기준으로 살펴보았다. 8월 10일 오전의 표면온도는 최고 약 53.8°C에서 최저 약 12.9°C로 나타났으며 낮중고도 시각의 표면온도는 최고 약 84.1°C에서 최저 약 10.6°C로 나타나 오전과 비교하여 최저온도는 약 2.3°C 하강하였고 최고온도는 약 30.4°C도 상승하였다. 오후 3시의 표면온도는 최고 약 81.7°C에서 최저 약 14.9°C로 나타나 오후 12시 39분보다 최고

표 5. 8월 10일 시기별 UAV 열적외 정사영상의 표면온도 비율

| AM 08:30 | | PM 12:39 | | PM 15:00 | |
|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Temperature (°C) | Ratio (%) | Temperature (°C) | Ratio (%) | Temperature (°C) | Ratio (%) |
| 12.9~20.0 | 0.02 | 10.6~20.0 | 0.02 | 14.9~20.0 | 0.01 |
| 20.0~25.0 | 0.17 | 20.0~30.0 | 3.04 | 20.0~30.0 | 0.25 |
| 25.0~30.0 | 20.42 | 30.0~40.0 | 25.41 | 30.0~40.0 | 25.38 |
| 30.0~35.0 | 51.14 | 40.0~50.0 | 49.35 | 40.0~50.0 | 39.83 |
| 35.0~40.0 | 19.68 | 50.0~60.0 | 17.01 | 50.0~60.0 | 30.71 |
| 40.0~45.0 | 7.24 | 60.0~70.0 | 4.96 | 60.0~70.0 | 3.06 |
| 45.0~53.8 | 1.33 | 70.0~84.1 | 0.20 | 70.0~81.7 | 0.76 |

표 6. 토지피복 유형별 표면온도 값

| Land-cover type (지역, m ²) | AM 08:30 Temperature (°C) | | | PM 12:39 Temperature (°C) | | | PM 15:00 Temperature (°C) | | |
|--|---------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | Max | Mean | Min | Max | Mean | Min | Max | Mean | Min |
| 도로 (11,385.4) | 49.99 | 32.41 | 25.54 | 79.00 | 44.26 | 19.51 | 74.99 | 45.75 | 21.62 |
| 공동주거시설 (869.9) | 41.76 | 33.78 | 25.68 | 72.10 | 46.04 | 27.99 | 78.08 | 49.86 | 30.39 |
| 단독주거시설 (3,572.9) | 48.60 | 33.22 | 23.19 | 73.22 | 46.53 | 20.75 | 76.99 | 50.09 | 21.51 |
| 기타 공공시설 (154.7) | 42.45 | 37.80 | 30.91 | 53.57 | 41.69 | 23.63 | 59.93 | 47.96 | 27.63 |
| 상업·업무시설 (18,144.9) | 53.81 | 34.90 | 17.07 | 82.77 | 47.19 | 13.13 | 81.71 | 48.38 | 17.84 |
| 대평시장 (2,995.3) | 46.53 | 35.07 | 15.27 | 84.07 | 45.15 | 10.62 | 69.24 | 46.82 | 14.91 |
| 기타나지 (2,374.4) | 45.94 | 31.10 | 23.13 | 68.03 | 43.50 | 26.37 | 73.87 | 45.16 | 27.52 |
| 밭 (351.2) | 47.12 | 29.14 | 23.05 | 58.04 | 38.69 | 29.40 | 59.89 | 39.66 | 28.79 |
| 혼효림 (3,024.8) | 43.01 | 30.52 | 24.73 | 59.74 | 35.17 | 24.20 | 62.63 | 35.79 | 27.65 |
| 활엽수림 (1,359.8) | 35.32 | 29.33 | 26.27 | 56.57 | 32.30 | 26.11 | 53.51 | 33.53 | 30.56 |

온도는 약 2.4°C 하락하였지만 최저온도는 약 4.3°C 상승하였다. 최고 표면온도는 오전보다 오후에 상승하는 경향이 나타났지만 최저 표면온도는 12시 39분이 가장 낮은 것으로 나타나 경향이 일정하지 않아 전체적인 표면온도 변화를 판단하기에는 어려운 것으로 나타났다.

따라서 표면온도의 구간을 설정하여 해당되는 격자의 비율을 살펴보았다(표 5). 오전에는 표면온도 30.0~35.0°C 구간의 비율이 51.14%로 가장 높게 나타났으며 전체의 약 98.38%가 25.0~45.0°C 구간에 포함되는 것으로 나타났다. 최고 및 최저 표면온도가 포함된 45.0°C 이상과 25.0°C 이하의 비율은 각각 약 1.33%, 0.19%로 나타났다.

남중고도 시각에는 표면온도 40.0~50.0°C의 구간이 약 49.35%이 가장 높게 나타났으며 전체의 약 99.7%가 20.0~70.0°C 구간에 포함되는 것으로 나타났다. 표면온도 최고 최저 구간은 70.0°C 이상과 20.0°C 이하로 비율은 각각 약 0.02%, 0.20%로 낮게 나타났다.

오후의 표면온도는 40.0~50.0°C의 구간의 비율이 약 39.83%로 가장 높았으며 전체의 약 98.98%가 30.0~70.0°C 구간에 포함되는 것으로 나타났다. 최저 표면온도 구간인 20.0°C이하의 비율은 남중고도 시각의 최저온도 구간보다 약 0.01% 감소하였으며 최고 표면온도 구간인 70.0°C 이상의 비율은 남중고도 시각의 동일 표면온도 구간보다

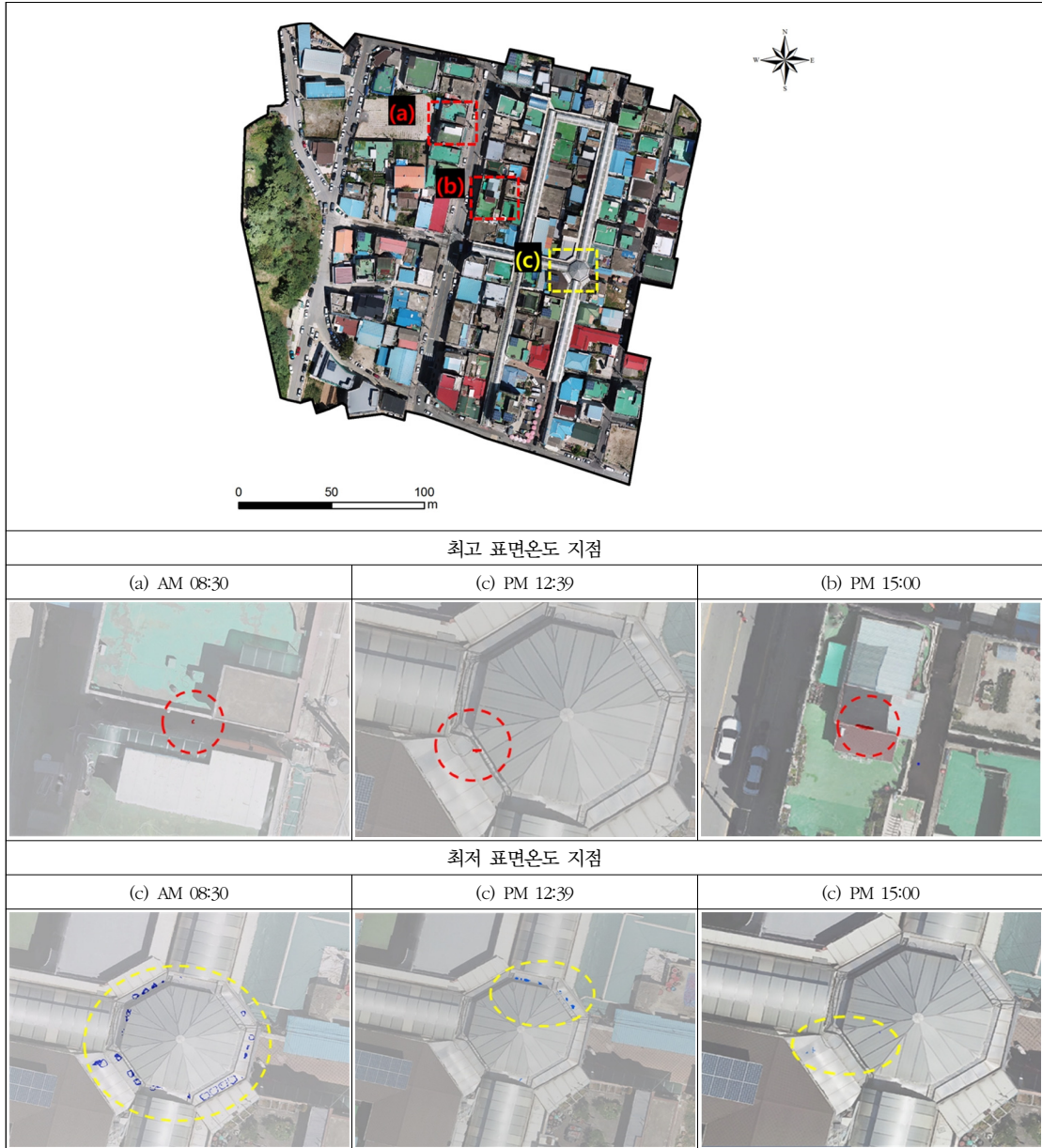


그림 4. UAV 열적외 정사영상 시기별 최고 및 최저 표면온도 지점

* ArcMap 10.1을 활용.

약 0.56% 증가한 것으로 나타났다. 세 시기 열적외 정사영상의 표면온도가 40.0°C 이상인 비율은 오전에는 약 8.57%였으나 낮중과 오후에는 약 60% 이상 증가하는 것으로 나타났다.

최소 및 최대 표면온도가 포함된 표면온도 구간 비율은 세 시기에서 약 2% 미만으로 낮게 나타나 시기별 열

적외 정사영상에서 최고 및 최저 표면온도가 나타난 지점을 확인하여 열적외 카메라의 오류 가능성을 파악하고자 하였다. 최고 표면온도 지점은 시설물의 지붕과 대평시장 아케이드인 것을 확인하였으며 최저 표면온도가 나타난 지점은 대평시장 아케이드를 중심으로 분포하는 것으로 나타났다(그림 4). 최고 표면온도를 나타낸 그림

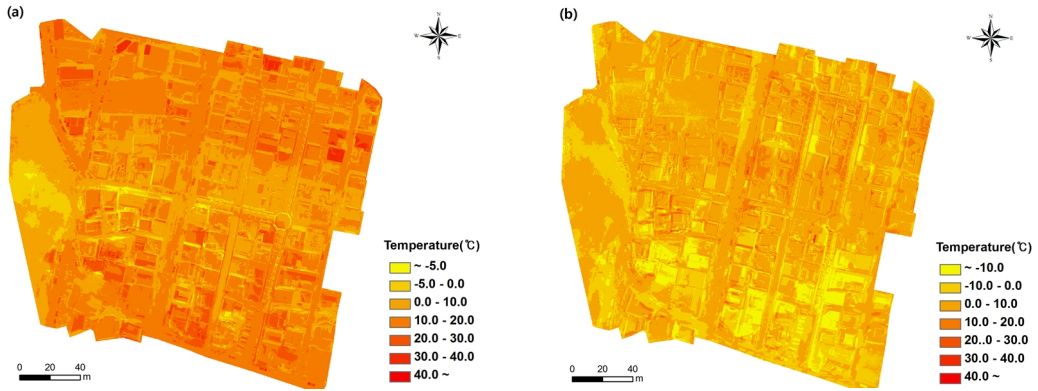


그림 5. 2018년 8월 10일 표면온도 변화 분포지도

* (a)는 AM 08:30부터 PM 12:39까지의 표면온도 변화; (b)는 AM 12:39부터 PM 15:00까지의 표면온도 변화.

** ArcMap 10.1을 활용.

4의 (a)는 플라스틱 소재의 구조물로 판단되며, 그림 4의 (b)는 지붕에 설치된 검은색의 차단막으로 판단되었다. 그림 4의 (c)는 대평시장 상단에 설치된 아케이드 재질은 유리 및 플라스틱소재로 판단되었다.

물체의 태양 반사율은 온도에 영향을 미치며 태양 반사율은 물체의 고도, 재질, 색상 등에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다(Takebayashi *et al.*, 2012). 최저 및 최고 표면온도 나타난 지점은 굴곡진 형태이며 플라스틱 소재, 유리 등으로 구성된 아케이드와 구조물, 그리고 차단막으로 그 재질과 형태가 일반 건물의 지붕과는 다른 것으로 나타나 태양 반사율에 영향을 받은 것으로 추정된다. 추후 연구에서는 UAV 열적외 영상 촬영 대상의 태양 반사율을 고려할 필요가 있으며 휴대용 표면온도 측정기를 통해 측정된 표면온도를 검증할 필요가 있다.

표면온도 변화를 공간적으로 분석하기 위해 먼저 토지피복 유형에 따른 시기별 표면온도의 최대, 평균, 최소 값을 계산하였다(표 6). 전반적으로 평균 표면온도는 오전에서 오후로 갈수록 상승하고 건물 등의 인공시설, 도로, 기타나지, 밭, 식생 순서로 표면온도가 높게 나타났다. 오전의 평균 표면온도는 도로와 인공시설이 약 32°C 이상으로 나타났으며 이중 기타 공공시설이 약 37.8°C로 가장 높게 나타났다. 기타나지, 밭, 식생은 약 31°C 이하로 나타났으며 활엽수림이 약 29.33°C로 가장 낮은 평균 표면온도가 나타났다. 남중고도 시각의 평균 표면온도는 도로와 인공시설, 그리고 기타나지가 약 41°C 이상으로 나타났으며 이중 상업·업무시설의 평균 표면온도가 47.19°C로 가장 높았다. 반면 밭과 식생의 평균 표면온

도는 약 39°C 이하인 것으로 나타났으며 오전과 마찬가지로 활엽수림의 평균 표면온도가 약 32.3°C로 가장 낮았다. 오후의 평균 표면온도는 도로와 인공시설, 그리고 기타나지가 약 45°C 이상으로 나타났으며 단독 주거시설의 평균 표면온도가 약 50.09°C로 가장 높았다. 밭과 식생은 약 40°C 이하로 나타났으며 마찬가지로 활엽수림의 평균 표면온도가 약 33.53°C로 가장 낮았다. 최대, 최소 표면온도 값도 오전에서 오후로 갈수록 전반적으로 상승하는 것으로 나타났지만 한 시기에서 유형별로 최소, 최대 표면온도 값의 차이가 크게 나타났다. 오전의 최소, 최대 표면온도 값의 차이는 약 9°C와 12°C로 나타난 활엽수림과 기타 공공시설을 제외하고 나머지 모두 약 20°C 이상이었으며, 남중고도 시각과 오후에는 모든 유형의 최소, 최대 표면온도 값의 차이가 약 30°C 이상으로 나타났다. 이는 그림 3과 같이 태양 반사율이 높거나 낮은 물질에서 측정된 최대, 최소 표면온도로 추정할 수 있으며, 토지피복도에서 분류하지 못한 자동차, 소규모 시설물, 단일 식생 등에서 측정된 표면온도의 영향일 가능성도 있다. 이처럼 본 연구에서 분류한 토지피복 유형만으로는 지점별로 나타나는 표면온도 변화의 특성을 파악하기에 제한적인 부분이 있으며 상세한 표면온도 변화 분석이 요구되는 상황에서는 촬영 대상의 색상과 재질, 크기를 고려하여 표면온도 변화를 분석할 필요가 있다.

지점별 표면온도 변화 요인을 분석하기 위해 시기별로 구축된 열적외 정사영상을 차연산하여 표면온도 변화 값을 지도화하였다(그림 5). 오전부터 남중고도 시각



그림 6. 색상(물질)에 따른 시설물 지붕 분류

* ArcMap 10.1을 활용.

까지의 표면온도 변화폭은 약 -5.0°C에서 약 40.0°C 이상까지인 것으로 나타났다(그림 5의 (a)). 토지피복 유형별 표면온도 변화를 분석한 결과와 마찬가지로 인공시설, 도로, 기타나지, 밭, 식생 순서로 표면온도 상승폭이 높게 나타난 가운데, 인공시설의 북쪽사면의 표면온도가 약 5.0°C 이상까지 감소한 것으로 나타났다. 이는 남중고도 시간에 촬영된 인공시설의 그림자의 영향인 것으로 판단된다. 남중고도 시각부터 오후까지의 표면온도 변화폭은 약 -10.0°C에서 약 40.0°C 이상으로 오전부터 남중시각까지의 표면온도 변화폭보다 크지만 표면온도가 30°C 이상 상승한 지점은 감소한 것으로 나타났다(그림 5의 (b)). 또한 인공시설의 동쪽사면의 표면온도가 10°C 이상까지 감소하는 현상이 나타났으며 인공시설의 높이와 지붕의 경사 및 형태에 따라 생성된 그림자의 영향인 것으로 판단된다. 보다 다양한 시기를 대상으로 UAV 열적외 정사영상을 구축한다면 인공시설의 고도 및 지붕의 형태 등에 의해 생성되는 그림자의 변화를 파악할 수 있으며 이에 따른 지점별 표면온도 저감 효과도 분석 가능할 것으로 기대된다.

일련의 표면온도의 변화를 분석한 결과, 표면온도는 촬영 대상의 색상, 재질, 그리고 형태 등에 따라 달라지는 태양 반사율에 영향을 받을 뿐만 아니라 시간의 흐름에 따라 주위에서 발생하는 그림자에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 시설물의 지붕 가운데 형태가 평평하고 일관된 재질로 이루어져 있으며 주변 시설물에 의한 그림자의 영향이 적은 지붕을 대상으로 색상을 분류(파란색 패널, 회색 콘크리트, 초록색 콘크리트, 하얀

표 7. 지붕 색상(재질)에 따른 표면온도

| Color (material) | Roof Surface Temperature (°C) | | |
|------------------|-------------------------------|----------|----------|
| | AM 08:30 | PM 12:39 | PM 15:00 |
| Gray (concrete) | 36.28 | 47.11 | 53.81 |
| Blue (tile) | 39.54 | 54.01 | 53.23 |
| Green (concrete) | 32.69 | 47.21 | 53.30 |
| White (concrete) | 35.24 | 41.99 | 47.19 |

색 콘크리트)하여 구축된 UAV 열적외 영상 촬영 시기별로 평균 표면온도를 계산하여 변화를 분석하였다(그림 6).

UAV 열적외 영상 촬영과 같은 시각에 측정된 세종급 남 AWS에서 측정된 온도는 약 7°C 상승하였지만 시설물 지붕의 표면온도는 약 12°C 이상 상승하였으며 지붕 유형별로 상승폭이 다르게 나타났다(표 7). 이중 태양 반사율이 가장 낮은 백색 콘크리트 지붕은 오전 약 35.24°C에서 남중고도 시각에는 약 41.99°C, 오후에는 약 47.19°C로 나타나 표면온도 상승폭이 약 12°C로 가장 낮았다. 초록색 콘크리트 지붕과 회색 콘크리트 지붕의 오전 표면온도는 각각 약 32.69°C와 36.28°C로 태양 반사율이 더 낮은 회색 콘크리트 지붕의 온도가 높았지만 남중고도 시각의 표면온도는 각각 약 47.21°C, 47.11°C로 오후에는 각각 약 53.30°C, 53.81°C로 유사한 표면온도가 나타났다. 세 가지 색상의 콘크리트 지붕은 오전부터 오후까지 지속적으로 온도가 상승했으며 태양반사율이 가장 높은 백색 지붕의 표면온도 상승폭이 가장 낮고 오후의 표면온도 또한 가장 낮은 것으로 나타났다. 비교적 태양 반사율이 낮은 회색과 초록색 지붕의 남중고도 시각과 오후의 표면온도는 백색 지붕보다 약 6°C씩 높은 것으로 나타났다.

반면 파란색 패널 지붕의 표면온도는 오전에 약 39.54°C, 남중고도 시각에는 약 54.01°C로 약 15°C 이상 표면온도가 상승하였지만 오후에는 53.23°C로 하강하였다. 패널은 금속재질로 다른 재질의 지붕보다 열전도율이 높아 태양고도에 따라 표면온도가 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(류택형·엄정섭, 2013). 태양빛은 남중고도 시각이후 점차 감소하기 때문에 패널 지붕이 콘크리트 지붕보다 빨리 식기 시작하는 것으로 추정된다.

UAV 열적외 정사영상을 통해 제한된 숫자의 지붕의

표면온도 변화를 분석하였지만 재질과 색상에 따라 표면온도 변화가 다르게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다. 추후 더 많은 시기의 열적외 영상 구축과 시설물 상세분류를 통해 시가지의 표면온도 변화 특성이 가능할 것으로 판단되며 이는 폭염에 취약한 지점 분석과 시설물별 냉방부하를 예측하는데 활용될 것으로 기대된다.

2. Landsat 8와 UAV 열적외 영상의 표면온도 비교

동시간대에 촬영된 UAV 열적외 영상과 Landsat 8의 열적외 센서 영상에서 추출된 표면온도를 비교하였으며 Landsat 8 열적외 영상의 공간해상도와 격자를 기준으로 각 격자에 중첩되는 UAV 열적외 영상의 평균값을 도출하였다(그림 7). UAV의 열적외 영상의 표면온도는 약

9.29°C에서 약 78.74°C로 나타났으며 토지피복유형과 시설물별로 표면온도 구분이 가능했다(그림 7의 (a)). 반면 Landsat 8 열적외 영상의 표면온도는 약 28.04°C에서 약 30.03°C로 나타났으며 연구지역 동쪽 식생지역의 표면온도가 낮고 시가지의 표면온도가 높은 것을 확인할 수 있었다(그림 7의 (c)). Landsat 8 열적외 영상의 격자와 공간해상도를 기준으로 UAV 열적외 영상의 표면온도 평균값을 산출한 결과 약 36.82°C에서 약 51.55°C로 나타났으며 시가지내에서도 표면온도가 상대적으로 높거나 낮은 지점을 확인할 수 있었다(그림 7의 (d)). 이 가운데 대평시장 인근의 시가지를 대상으로 Landsat 8 열적외 영상 기준의 한 격자를 선택하여 표면온도 분포를 살펴보았다(그림 7의 (b)). Landsat 8 열적외 영상에서 해당 격자의 표면온도는 약 29.87°C이었고 UAV 열적외 영상의 표면온도는 약 21.06°C에서 약 69.47°C로 나타났으며

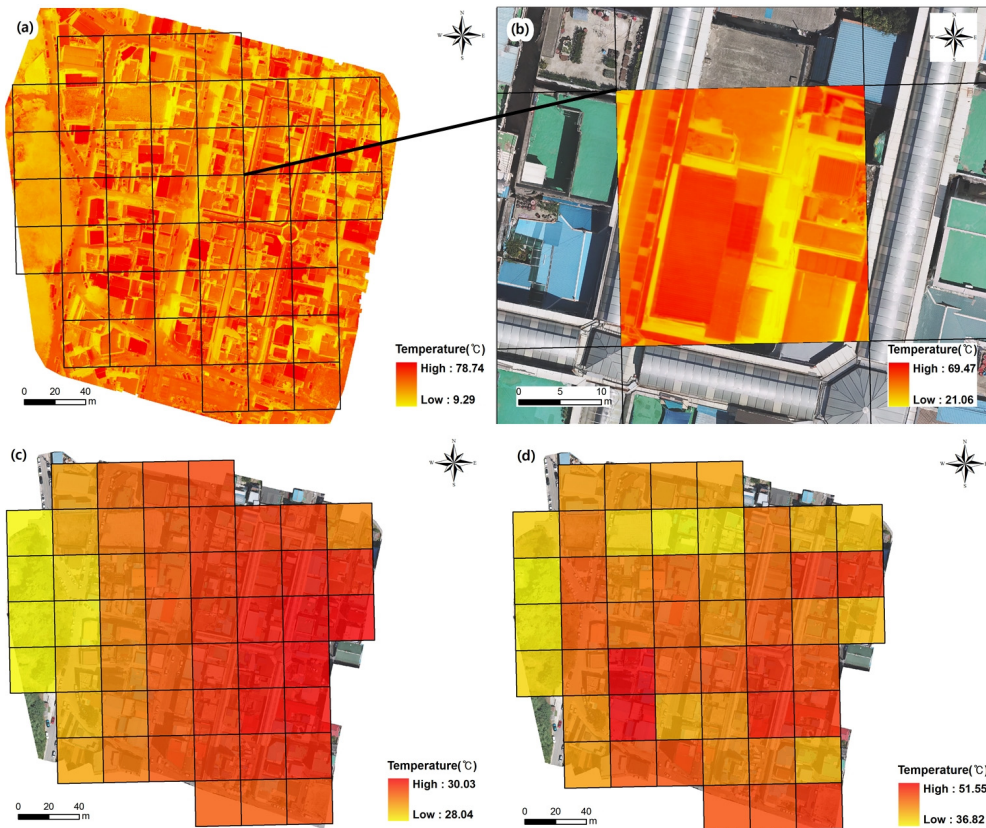


그림 7. 8월 22일 열적외 영상

* (a)는 UAV 열적외의 정사영상; (b)는 대평시장 인근의 UAV 열적외의 정사영상; (c)는 Landsat 8 열적외의 영상; (d)는 Landsat 8 해상도 기준의 UAV 열적외의 영상 평균 온도.

** ArcMap 10.1을 활용.

평균 표면온도는 약 46.70°C였다.

Landsat 8 열적외 영상의 공간해상도는 30m인데 반해 UAV 열적외 영상의 공간해상도는 약 6cm이기 때문에 시가지의 표면유형에 따른 다양한 표면온도 값이 측정된 것으로 판단된다. 하지만 UAV는 위성과 비교하여 1회 촬영 시 취득할 수 있는 영상의 면적이 좁기 때문에 넓은 지역을 대상으로 고해상도의 표면온도 값을 측정하기에는 한계가 있다. 따라서 추후 동일시기를 대상으로 위성의 적외선 영상과 UAV 적외선 영상을 수집하여 두 영상에서 측정된 표면온도의 관계를 도출하면 위성 영상에서 취득된 대규모 시가지의 표면온도 값의 정확도를 높이는데 UAV 적외선 영상을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론

본 연구에서는 여름철 폭염 시 시가지의 표면온도 변화를 분석하기 위해 UAV 기반의 열적외 카메라와 휴대용 표면온도 측정기를 활용하여 시가지의 표면온도를 측정하였다. 2018년 8월 10일 오전 8시 30분에 열적외 영상과 광학 영상을 촬영하였고 남중고도 시각이었던 오후 12시 39분과 그리고 오후 3시를 대상으로 열적외 영상을 추가적으로 수집하였다. 수집된 영상은 SIFT, SFM 알고리즘을 활용하여 공간해상도 6cm 급의 열적외 정사영상과 2cm 급의 광학 정사영상을 구축하였다. 또한 Landsat 8의 연구지역 촬영시기인 8월 22일 오전 11시에 UAV 열적외 영상을 구축하여 Landsat 8 열적외 영상과 UAV 열적외 영상에서 추출된 표면온도를 비교 분석하였다.

UAV 열적외 정사영상과 휴대용 표면온도 측정기에서 측정된 표면온도는 시기별로 휴대용 표면온도 측정기에서 측정한 표면온도가 약 1.0~1.3°C씩 높은 것으로 나타났다. 한 지점을 대상으로만 휴대용 표면온도 측정기를 적용하였기 때문에 추후 더 많은 지점을 대상으로 표면온도 값을 측정하고 비교할 필요가 있다.

UAV 열적외 영상에서 시기별로 최소 및 최대 표면온도가 나타난 지점은 유리 및 플라스틱소재의 아케이드 지붕과 검은색 차단막을 중심으로 최고 및 최대 표면온도가 나타난 것을 확인하였다. 추후 이러한 지점을 대상으로 태양 반사율을 고려하고 휴대용 표면온도 측정기

를 활용하여 열적외 카메라의 오류 가능성을 파악할 필요가 있다.

토지피복별 표면온도 변화 분석결과 오전에서 오후로 갈수록 상승하고 건물 등의 인공시설, 도로, 기타나지, 밭, 식생 순서로 표면온도가 높게 나타났다. 하지만 시기별로 발생한 그림자의 영향으로 온도가 하강하는 지점을 확인하였다. 보다 다양한 시기의 UAV 열적외 정사영상을 구축하면 인공시설의 고도 및 지붕의 형태 등에 의해 생성되는 그림자와 표면온도 저감 효과를 분석 가능할 것으로 기대된다. 또한 시설물 옥상의 재질과 색상에 따라 표면온도 변화가 다르게 나타나는 경향을 확인하였다. 추후 시설물 옥상의 재질, 색상 등을 고려하여 폭염 시 표면온도 상승이 높은 시설물을 확인하고 시설물의 냉방부하를 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

기존 시가지 표면온도 분석에 주로 활용되었던 Landsat 8 열적외 영상은 공간해상도는 30m인데 반해 UAV 열적외 영상의 공간해상도는 약 6cm로 구축 가능하였다. Landsat 8 열적외 영상에서 추출된 표면온도는 약 28.04°C에서 약 30.03°C로 나타났지만 UAV 열적외 영상에서는 약 9.29°C에서 약 78.74°C로 나타나 시가지의 표면유형에 따른 다양한 표면온도 값이 측정 가능한 것으로 판단된다. 하지만 UAV는 넓은 지역을 대상으로 고해상도의 표면온도 값을 측정하기에는 한계가 있기 때문에 추후 동일시기를 대상으로 위성의 적외선 영상과 UAV 적외선 영상을 수집하면 위성영상에서 취득된 대규모 시가지 지역의 표면온도 값의 정확도를 높이는데 UAV 적외선 영상을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 국립기상과학원, 2016, "Landsat 8 위성자료를 이용한 지표 표면온도 산출 및 도심녹지효과 분석" 「국립기상과학원 응용기상연구과 기술노트」, 5.
- 권용석, 2018, "스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할" 기상기술정책, 11(1), 44-53(http://www.kma.go.kr/down/t_policy/t_policy_201806.pdf).
- 김근화·이영곤·김재환·최희욱·김백조, 2018, "Landsat 8 위성자료를 이용한 도심녹지 냉각효과 분석" 대한원격탐사학회지, 34(2), 167-178.

- 김동우·박종철·장동호, 2017, “표준강수지수와 정규식생지수를 활용한 봄 가뭄 탐지 가능성 분석” 한국지리학회지, 6(2), 165-174.
- 김태현·이원희·한유경, 2018, “Landsat-8 시계열 위성영상을 활용한 도심지 확장에 따른 열섬포텐셜 분석” 한국측량학회지, 36(4), 305-316.
- 류택형·엄정섭, 2013, “원격 열화상을 이용한 지붕색상별 겨울철 표면온도 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.
- 손승우·유재진·전형진·임성하·강영은·윤정호, 2017, “UAS 기반 대형 폐기물 발생량 측정 가능성 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.
- 유영철·임국목·성낙현·김동호·이강호·강상진, 2016, “열화상(FLIR) UAV를 통한 저수지 진단 활용성 연구” 대한지질공학회 학술발표논문집, 2016(1), 203-204.
- 유재진·박현수·김동우·윤정호·손승우, 2018, “멀티 카메라와 SfM 기법을 활용한 해식애 모니터링 적용가능성 평가” 한국지형학회지, 25(1), 67-80.
- 이근상·이종조, 2017, “UAV 기반 열적외선 센서를 이용한 태양광 셀의 발열 검출” 한국지형공간정보학회지, 25(1), 71-78.
- 지준범·김부요·조일성·이규태·최영진, 2016, “고해상도 Landsat 8 위성자료기반의 지표면 온도 산출” 대한원격탐사학회지, 32(2), 171-183.
- 최태영·문호경·차재규, 2017, “무인항공 영상을 활용한 도심 녹지 표면온도 특성 분석 -익산 소라산 자연마당을 대상으로” 한국지리정보학회지, 20(3), 90-103.
- Coveney, S. and Roberts, K., 2017, Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for environmental applications: Data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling, *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 3159-3180.
- Coveney, S., Fotheringham, A.S., Charlton, M., and McCarthy, T., 2010, Dual-scale validation of a medium-resolution coastal DEM with terrestrial LiDAR DSM and GPS, *Computers & Geosciences*, 36(4), 489-499.
- 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 (http://epic.awi.de/37530/1/IPCC_AR5_SYR_Final.pdf).
- Nishar, A., Richards, S., Breen, D., Robertson, J., and Breen, B., 2016, Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei-Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand, *Renewable Energy*, 86, 1256-1264.
- Takebayashi, H., Moriyama, M., and Sugihara, T., 2012, Study on the cool roof effect of Japanese traditional tiled roof: Numerical analysis of solar reflectance of unevenness tiled surface and heat budget of typical tiled roof system, *Energy & Buildings*, 55, 77-84.
- USGS, 2018, *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook (LSDS-1574, Version 3.0)*.
- 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr>
- 환경공간정보서비스, <https://egis.me.go.kr>
- NASA, <https://asterweb.jpl.nasa.gov>
- 교신 : 손승우, 30147, 세종특별자치시 시청대로 370, 세종국책연구단지 B동 8-11층, 한국환경정책·평가연구원(이메일: swson@kei.re.kr)
- Correspondence : Seung Woo Son, 30147, 8-11F, Bldg. B, 370 Sicheong-daero, Sejong Special Self-Governing City, Korea, Korea Environment Institute (Email: swson@kei.re.kr)

투 고 일: 2018년 11월 28일
심사완료일: 2018년 12월 13일
투고확정일: 2019년 2월 20일