

도시 내 열환경 분석에서 무인항공기의 활용가능성[†]

강다인* · 문호경* · 성선용** · 차재규*

*국립생태원 생태연구본부 · **국립생태원 생태조사평가본부

Applicability of UAV in Urban Thermal Environment Analysis

Kang, Da-In* · Moon, Ho-Gyeong* · Sung, Sun-Yong** · Cha, Jae-Gyu*

*National Institute of Ecology, Bureau of Ecological Research

**National Institute of Ecology, Bureau of Ecological Survey Assessment

ABSTRACT

Urban heat islands occur due to increases in the extent of artificial surfaces such as concrete, asphalt and high-rise buildings. In this regard, research into the use of satellite thermal infrared images for thermal environment analysis of urban areas is being carried out. However, such analysis of the characteristics of individual land cover with low-resolution satellite images suffers from limitations because land cover patterns in urban areas are complicated. Recently, UAV has been widely used, which can compensate for this limitation as it is able to acquire high-resolution images. In this paper, the accuracy of UAV infrared images is verified and the applicability of UAV in urban thermal environment analysis is examined by comparing the results with land surface temperatures from Landsat 8 thermal images. The results show a high positive correlation of temperature values at 0.95, and no statistically significant difference between the two groups. Comparisons of land surface temperature according to land cover showed that the largest difference observed was 4.63°C in the Used area, and UAV images with small cell units reflected various surface temperatures. Furthermore, it was possible to analyze the surface temperatures of various green spaces such as wetlands and street tree areas, which can lower surface temperatures in urban areas, with street tree shadows reducing surface temperatures by about 4-6°C. UAV can easily and rapidly measure the surface temperature of urban areas and is able to analyze various types of green spaces. Thus, this is an effective tool for thermal environment analysis in urban areas to aid in the design or management of urban green spaces, as it can allow for land cover and the effects of the various green spaces.

Key Words: Fixed-wing, Landsat 8, Thermal Infrared Image, Land Surface Temperature

국문초록

도시는 콘크리트, 아스팔트 등 인공적인 피복과 고층 건물의 증가로 인해 열섬현상이 발생되고 있다. 이와 관련하여

[†]: 이 논문은 국립생태원의 자체연구과제(NIE-기반연구-2018-08)의 지원으로 수행되었으며, (사)한국지리정보학회 2017 추계 학술대회에 소개된 내용을 수정 및 발전시켰음.

Corresponding author: Jae-Gyu Cha, National Institute of Ecology, Bureau of Ecological Research, Chungnam 33657, Korea, Tel.: +82-41-950-5415, E-mail: flow@nie.re.kr

인공위성 열적외 영상을 활용한 도시의 열환경 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 복잡한 토지피복을 가진 도시의 열환경 특성을 분석하기에는 위성영상의 공간해상도는 한계를 가지고 있다. 무인항공기(UAV)는 높은 해상도의 영상을 취득할 수 있어 이러한 한계점을 보완하기에 적절하며, 최근 폭넓게 활용되고 있다. 이에 본 연구는 무인항공기 열적외 영상의 정확성 검증과 Landsat 8 열적외 영상과의 해상도 비교를 통한 도시 내 열환경 분석에서 활용가능성에 대해 검토하였다. 정확성 검증 결과, 온도 값의 상관관계는 0.95로 높은 양의 상관관계를 보였고, 두 집단의 통계적 차이가 없었다. 해상도 비교를 위한 두 영상의 지표온도의 차이 분석 결과, 시가화 지역이 4.63℃로 가장 높은 차이를 보였으며, 셀 단위가 작은 무인항공기영상이 다양한 지표온도를 반영하였다. 온도 그래프 비교 결과, 도시의 지표온도를 낮출 수 있는 습지, 가로녹지 등의 세부적인 공간의 지표온도 분석이 가능하였고, 가로수 그림자의 지표온도저감 효과 분석 결과, 약 4~6℃ 가량 낮추는 것으로 나타났다. 무인항공기는 세부적인 공간의 분석이 가능하였고, 단시간에 일정 면적의 지표온도를 취득하기 용이하였다. 따라서 무인항공기는 피복을 고려한 공원의 조성이나 관리, 소규모 녹지의 효과 분석 등 도시 내 열환경 분석 전반에 걸쳐 높은 활용성을 가질 것이라 판단된다.

주제어: 고정익, Landsat 8, 열적외 영상, 지표온도

I. 서론

많은 도시들이 성장하는 과정에서 다수의 지표면피복이 콘크리트, 아스팔트 등 인공적인 피복과 고층 건물들로 변화하였고, 인공피복은 열용량이 작기 때문에 지표온도를 올려 도시 지역이 교외지역보다 온도가 높은 도시열섬현상(Urban Heat Island: UHI)이 발생하였다(Liu and Zhang, 2011; Milosević *et al.*, 2017). 열섬현상으로 인해 1995년 미국 시카고 시에서 약 700명의 노약자 인명피해가 보고된 바 있었고, 에너지 사용 증가와 농작물의 피해 등의 다양한 문제를 야기하고 있다(KEI, 2009).

이러한 문제점들을 해결하기 위해 인공피복이나 녹지 등에 따른 열환경 변화에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있었다. 도시 전체 등 어느 정도 규모가 있는 영역에 대한 분석은 인공위성이 널리 활용되었다(Du *et al.*, 2017). 인공위성의 열적외 영상을 활용하여 지표면의 피복과 지표온도간의 상관관계를 규명하였고(Park *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2014), 녹지의 지표온도 저감 효과를 분석하였다(Park and Cho, 2016; Soltani and Sharifi, 2017). 그러나 인공위성은 도시 전체 또는 광역적 열환경 분석에 대해서는 효과적이었으나, 낮은 해상도로 인해 세부 피복별 특성을 고려한 분석에는 한계를 가졌다. 또한 촬영시기가 한정되어 있어 원하는 시점에 찍을 수 없으며, 대기나 기상상황에 많은 영향을 받아 자료 취득의 어려움이 있다(Choi *et al.*, 2017). 현재 소규모 녹지의 열환경 분석은 시뮬레이션이나 현장조사 등의 방법으로 진행되고 있었다. 시뮬레이션을 이용하여 소규모 녹지의 대기온도 저감 효과를 분석하고(Wang and Akbari, 2016), 현장조사를 실시하여 도심의 소규모 녹지공간과 가로수의 기온저감 효과를 밝혀냈다(Jung *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2017). 현장조사를 통해 얻은 결과 값을 시뮬레이션에 대입해 보다 정확한 나무의 열 스

트레스 저감효과에 대한 분석 연구도 진행되었다(Milosević *et al.*, 2017). 그러나 현장조사의 관측 지점이 제한적이며, 점적인 데이터만을 취득하기 때문에 면적에 대해 정확한 값을 취득할 수 없으며, 장비와 인력 등의 한계로 일정면적의 온도를 취득하기 비효율적이었다. 또한 시뮬레이션은 현장에서 일어나는 다양한 변수 값이 통제되어 실증적이지 않았다.

무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)는 이러한 단점을 보완하기에 적절한 수단으로써 이용 가능하다. cm 단위의 고해상도의 열적외 영상을 얻을 수 있어 피복별 특성을 고려한 분석에 적합하며, 단시간에 지표온도를 취득할 수 있어 효율적이다. 위성영상보다 낮은 고도에서 촬영하기 때문에 구름이나 대기의 영향을 적게 받으며, 원하는 시간에 촬영이 가능하다. 또한 비교적 저렴한 가격과 운용의 용이함 때문에 최근 농·어업분야, 기상관측분야와 통신분야 등 다양한 분야에서 사용되고 있다(Kim *et al.*, 2014).

최근에는 구상나무의 개체 식별을 위해 무인항공기를 활용하거나(Lim, 2016), 경관분석을 위한 활용방안을 제시한 연구(Kim, 2014)가 진행된 바 있지만, 무인항공기를 이용한 연구는 초기 단계로 활용가능성에 대한 연구가 주를 이루고 있었다(Moon *et al.*, 2017). 그러나 도시 내 녹지를 대상으로 열환경 분석을 위한 무인항공기 활용연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구는 무인항공기 열적외 영상의 정확성을 확인하고, Landsat 8 영상과의 해상도 비교를 통해, 도시 내 소규모 녹지의 열환경 분석 시 활용성을 검토하고자 한다.

II. 연구 내용 및 방법

1. 연구 대상지

연구의 대상지는 전라북도 익산시 영등동에 위치하고 있는

소라산 자연마당 일대로 선정하였다. 익산 소라산 자연마당은 습지, 초지, 산림 등 다양한 피복이 존재하며, 주변으로는 주거지, 상업지 등 인공적인 피복으로 둘러싸여 있는 녹지공간이다 (Figure 1 참조). 이 녹지공간은 위성영상에서 피복의 열환경 특징을 판단하기 어려운 규모로 고해상도 무인항공기 영상의 활용성 검토에 적합한 지역으로 판단되어 연구의 대상지로 선정하였다. 열환경 분석은 약 760×650m의 면적에 대해 실시하였다.

2. 연구의 흐름

연구의 흐름은 무인항공기 열적외 영상의 정확성 검증과 Landsat 8 열적외 영상과의 해상도 비교를 통한 도시 내 열환경 분석에서 활용가능성 검토로 구성되어 있다(Figure 2 참조). 무인항공기 열적외 영상의 정확성을 검증하고자 현장조사를 통한 실제 측정값과의 통계적 상관성 검증과정을 거쳤다. 해상도 비교를 위해 무인항공기와 Landsat 8 열적외 영상에서 산출된 지표온도를 비교 분석하였다. 이를 바탕으로 도시 내 열환경 분석의 적용 가능성을 검토하고자 가로녹지를 대상으로 그림자 효과를 분석하였다.

1) 무인항공기 열적외 영상 수집 및 지표온도 추출

senseFly사의 고정익인 eBee에 열적외 카메라를 탑재하여 지표 온도(Land Surface Temperature: LST)를 취득하였다. eBee의 날개길이는 96cm, 무게는 0.69kg, 속도는 40~90km/h, 최대 비행고도 1km이다(Choi *et al.*, 2017). 촬영 센서는 eBee thermoMAP(TIR)을 활용하였고, 이미지 크기는 640×512 pixels이며, -40~160℃의 온도 범위에서 0.1℃단위로 측정할 수 있다(Table 1, Figure 3 참조).

senseFly사에서 제공하는 software인 emotion2를 이용한 자동비행을 통해서 약 30cm 해상도의 영상 데이터를 취득하였다.

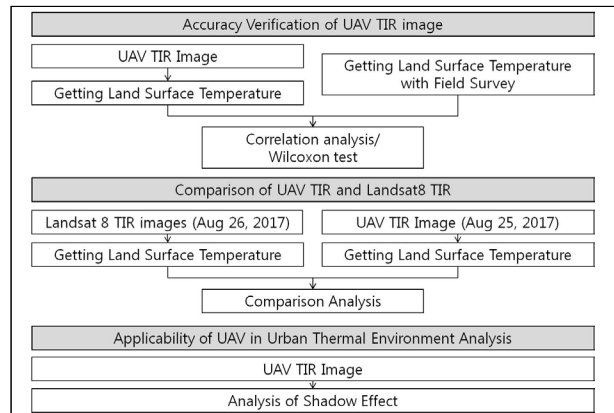


Figure 2. Flowchart

Table 1. Features of UAV and thermoMAP

UAV	
Wingspan	960mm
Weight	0.69kg
Speed	40~90km/h
Maximum flight level	1km
Maximum flight time	45 minutes
ThermoMAP	
Image size	640×512 pixels
Scene temperature	-40~160℃
Temperature resolution	0.1℃



Figure 3. eBee

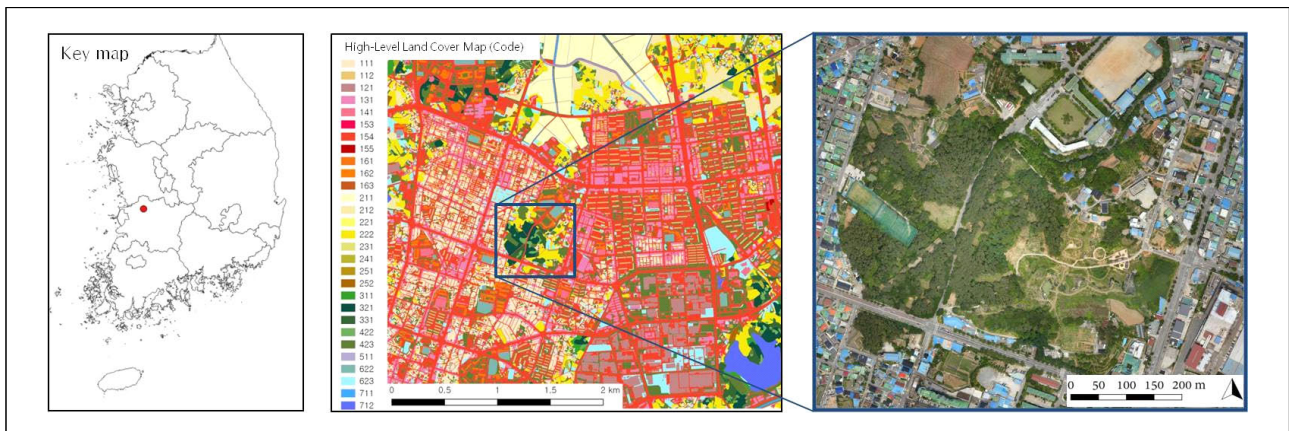


Figure 1. Study site

영상 처리과정은 지상기준점이 필요 없는 SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 방식으로 수행되는데, 실시간으로 수집된 기체의 자세정보와 스테레오 영상으로부터 외부표정요소를 추정한 후, tie point를 자동 생성하여 최종 정사영상을 생성하는 방식으로 진행되었다(Moon *et al.*, 2017). 취득된 데이터는 Pix4Dmapper를 이용하여 영상 접합 후 온도변환식을 적용하여 섭씨온도로 변환하였다.

2) 표면측정 온도계의 지표면 온도 추출

표면을 측정할 수 있는 온도계는 testo사의 testo 835-T2를 사용하였다. 열전대 K타입(NiCr-Ni)으로 측정 범위는 $-50 \sim +600^{\circ}\text{C}$ 이며, 정확도 $\pm(0.5^{\circ}\text{C} + 0.5 \text{ 측정값의 } \%)$ 의 성능, 0.1°F 의 분해능을 가지고 있다. 측정 범위는 지름 24mm부터 100mm의 포인트 지점으로 측정이 가능하며, 바로 앞에서 측정 시 24mm, 약 2m떨어진 지점 측정 시 40mm의 범위로 측정된다. 본 연구에서는 오차를 줄이기 위해 0.5m 정도 떨어진 거리에서 같은 지점의 온도를 3번 측정하여 평균값을 사용하였다. 현장 위치의 좌표는 Garmin사의 GPS 장비(Montana 650TK)를 사용하여 취득하였다.

3) 무인항공기 열적외 영상의 정확성 검증

무인항공기 열적외 영상에서 취득한 지표온도 값의 정확성을 판단하기 위해 실제로 측정한 지표온도 값과 비교하였다. 두 값의 유의성을 검증하기 위한 상관성 분석과 차이를 검증하기 위한 통계적 검정을 실시하였다. 상관성 분석은 시간대 별 이상치를 판별한 후, 제거 여부를 결정한 뒤 Pearson 상관분석을 실시하였다. 두 집단 간 차이를 판단하기 위한 정규성 검정결과, 정규성을 만족하지 못하여 Wilcoxon 검정을 실시하였다(Lee and Noh, 2013). 두 가지 분석 모두 R Package 3.3.3을 사용하여 분석하였다.

정확성 검증은 한 여름보다는 비교적 대기가 안정되고 구름이 적은 가을(9월 13일)에 실시하였다. Landsat 8 위성이 지나가는 시간대인 11시, 그리고 오후 시간대인 14시에 촬영하였다. 11시와 14시 정각에 무인항공기 촬영을 시작하고, 그와 동시에 표면온도계를 통해 지표온도 측정 및 측정 지점의 GPS 좌표를 취득하였다. 이 모든 과정은 같은 시간대에 이루어지도록 1시간 이내에 완료하였다. 온도 측정 지점은 정확도 개선과 도시의 열환경 분석에서 무인항공기의 적용가능성에 대한 판단이 이루어질 것을 고려하여 녹지지역과 인공지역의 지점의 수를 비슷하게 선정하였다. 각 지역의 세부지점은 세분류 토지피복도를 기준으로 같은 피복 내 3지점 이상 측정하여 13지점의 녹지지역과 12지점의 인공지역을 측정하였다. 11시는 25개의 지점, 14시에는 자연마당 내 인공지역 1지점이 더 추가되어 26개의 지점으로부터 온도측정을 하여 총 51개 지점의 측정값을 얻었다(Figure 4 참조). 촬영된 무인항공기 영상은 Arc Map 10.3

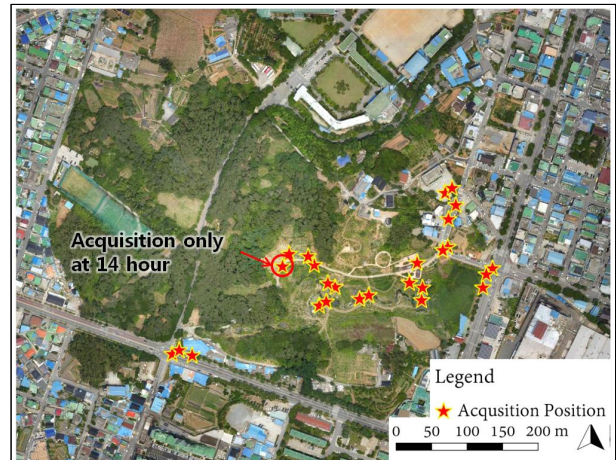


Figure 4. LST acquisition position
Legend: ★ Acquisition position

을 이용하여 실측값이 있는 지점의 온도 값을 추출하였다.

4) Landsat 8 열적외 영상 수집 및 지표온도 추출

도시 내 지표에 따른 온도 변화 양상은 여름에 뚜렷하게 나타나므로 무인항공기 열적외 영상과 비교할 Landsat 8 OLI/TIRS 영상은 2017년 8월 26일 데이터를 수집하여 사용하였으며, 그 정보는 Table 2와 같다.

Landsat 8 위성은 OLI(Operational Land Imager)센서와 TIRS(Thermal Infrared Sensor)센서가 있으며, TIRS 센서의 2개 band로 지표온도 계산이 가능하다. band의 공간해상도는 100m이지만, 30m 해상도로 보간되어 제공된다(USGS, 2016). 두 가지 band 중 band 10번을 사용하여 USGS에서 제공된 식에 따라 지표온도를 계산하였다. 먼저 각 band가 가지고 있는 고유의 Digital Number(DN)값을 식 (1)에 따라 분광복사휘도로 변환하였다.

$$L_A = M_L Q_{cal} + A_L \quad (\text{식 } 1)$$

$$L_A = \text{분광복사휘도 (Watts/(m}^2 \times \text{srad} \times \mu\text{m))}$$

$$M_L = \text{밴드 고유의 배수 환산계수}$$

$$Q_{cal} = \text{DN 값}$$

$$A_L = \text{밴드 고유의 가산 환산계수}$$

Table 2. Characteristic of used satellite data

Attribute	Value
Acquisition Data and time	2017/08/26 11:00 am
Scene cloud cover	7.6%
Image quality	9
Sun elevation	57.7°

밴드 고유의 배수 환산계수는 $RADIANCE_MULT_BAND_x$ 에, 밴드 고유의 가산 환산계수는 $RADIANCE_ADD_BAND_x$ 에 기입되어 있으며, x 는 band 번호이다. 계산된 분광복사휘도(L_λ)를 식 (2)에 따라 밝기온도(T)로 산출하였다.

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

L_λ = 분광복사휘도

K_1, K_2 = 밴드 고유의 열 변환 상수(Table 3 참조)

Table 3. TIR thermal constant

	K_1	K_2
Band 10	774.8853	1,321.0789
Band 11	480.8883	1,201.1442

USGS에서 제공된 계산식은 밝기온도를 구하는 식으로, 방출률을 고려한 지표온도를 산출하고자 국립기상과학원에서 제시한 식을 추가로 사용하였다. 계산된 밝기온도(T)를 NDVI 값에 따라 방출률을 적용하는 식 (3)에 따라 지표온도(LST)를 산출하였다(NIMS, 2016).

$$LST = \frac{1}{\varepsilon^4} T \quad (\text{식 } 3)$$

T = 밝기온도

ε = 방출률(Table 4 참조)

Table 4. Emissivity according to NDVI ranges

NDVI ranges	Emissivity(ε)
$NDVI < -0.185$	0.995
$-0.185 \leq NDVI < 0.157$	0.970
$0.157 \leq NDVI \leq 0.727$	$1.0094 + 0.047 \ln(NDVI)$
$NDVI > 0.727$	0.990

Source: NIMS(2016)

5) 무인항공기와 Landsat 8 열적외 영상의 해상도 비교

두 영상의 차이를 분석하기 전, 두 가지 데이터 취득일의 기상상태를 먼저 파악하였고, 기상관측자료는 대상지에서 가장 가까운 데 위치 한 익산시 함라면에서 수집된 자료를 사용하였다. 무인항공기를 이용하여 촬영한 8월 25일은 최고온도 30.8℃, 최저온도 20.7℃, 평균온도 25.1℃로 구름이 없는 맑은 날이었다. Landsat 8의 데이터를 취득한 8월 26일은 최고온도 29.5℃, 최

저온도 17.5℃, 평균온도 22.2℃로 무인항공기촬영을 한 시기와 유사한 대기상태를 보였다.

무인항공기와 Landsat 8 열적외 영상의 해상도에 따른 차이를 분석하고자 두 영상에서 추출한 지표온도 값을 토지피복 별로 비교하였고, Profile tool을 활용하여 같은 구간의 지표온도 값을 비교하였다. 같은 구간의 온도 분석 시, 무인항공기영상의 해상도는 약 30cm로 피복의 색이나 재질 등에 따라 급격한 변화를 보이기 때문에 하나의 셀 값이 아닌 세로 30m, 가로 30cm인 셀을 새로 생성하여 그 셀 내부의 지표온도의 평균값을 구해 온도 값의 변화를 분석하였다(Figure 5 참조). 셀의 크기는 무인항공기와 Landsat 8의 해상도를 기준으로 가로 30cm, 세로 30m의 값으로 설정하였다.

6) 도시 내 열환경 분석에서 무인항공기의 적용 가능성

무인항공기 열적외 영상의 도시 내 열환경 분석에서 적용 가능성을 알아보기 위해 해상도가 낮은 위성영상에서 분석의 한계가 있지만, 열환경 개선효과가 있다고 알려진 가로녹지에 적용하여 보았다. 가로수는 그늘을 제공하여 기온저감에 상당한 영향을 미치는데(Jung *et al.*, 2015), 무인항공기를 통해 그 효과를 검토하였다. 그림자 효과를 분석하기 위해 그림자가 드리워진 가로수와 그림자가 없는 가로수의 수관 끝에서부터 1m 간격으로 Buffer를 주었고, 간격 별 지표온도 값의 평균과 중간 값을 구하였다. 지표온도 값은 피복에 따라 변화하므로 도로(보도 및 아스팔트)만 선택하여 분석하였고, 총 4m까지의 지표온도의 변화를 분석하였다(Figure 6 참조).

III. 결과 및 고찰

1. 무인항공기 열적외 영상의 정확성 검증

실제로 측정한 지표온도와 무인항공기 측정값의 상관관계수

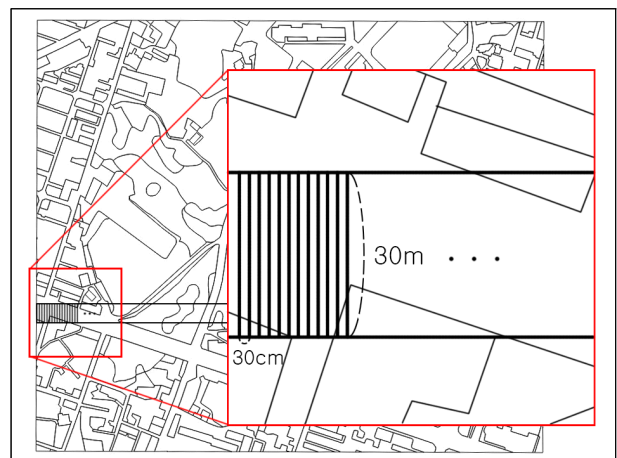


Figure 5. Method of acquisition for LST in UAV TIR

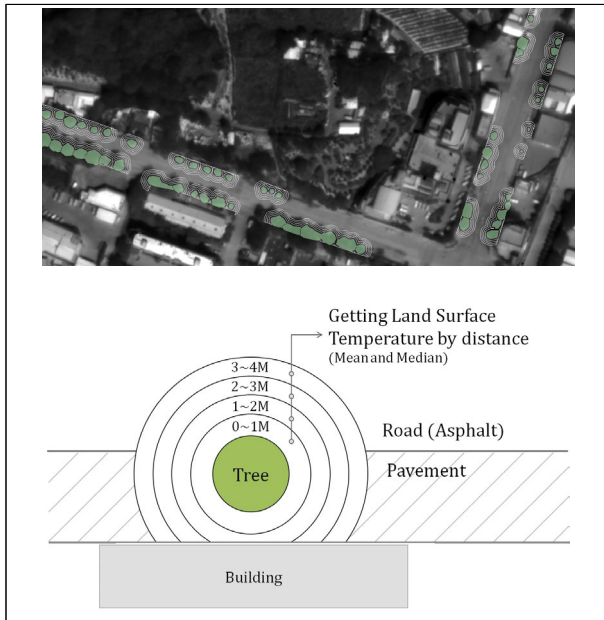


Figure 6. Buffer from canopy(per 1m)

는 11시에 0.97($R^2=0.94$), 14시에 0.95($R^2=0.90$)이었다. 일반적으로 상관계수가 0.8이상이면 강한 양의 상관관계를 보인다고 해석할 수 있는데(Lee and Noh, 2013), 11시와 14시에 취득한 결과 값 모두 0.9이상으로 강한 양의 상관관계를 보였고, 두 시간대 중 11시가 더 강한 상관관계를 보였다. 두 시간대 전체 데이터에 대하여 상관성을 분석한 결과, 상관계수가 0.95($R^2=0.90$)로 나타나, 실측값과 무인항공기 열적외 영상 값의 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다(Figure 7 참조).

두 집단 간 통계적 차이 여부에 대한 판단을 하고자 비모수 검정인 wilcoxon 검정을 실시하였다. 측정값의 평균 온도 값은 34.9℃이고, 무인항공기 열적외 영상의 온도 값은 36.2℃로 나타났다. 하지만 Wilcoxon 검정 결과, p 값이 0.07로 유의수준 0.05보다 크므로 귀무가설을 채택한다(Lee and Noh, 2013). 즉, 두 온도 값에 유의한 차이가 없다(Table 5 참조). 따라서 무인

Table 5. Result of Wilcoxon-test

Temp.(MEAN±SD)		v	p
Measuring	UAV TIR		
34.9±8.96	36.2±6.24	449	0.07

항공기는 단시간에 일정 면적에 대한 비교적 정확한 온도 값을 취득하기 용이하였다.

2. 무인항공기와 Landsat 8 열적외 영상의 해상도 비교

무인항공기와 Landsat 8 열적외 영상의 해상도를 비교하고자 토지 피복별 지표 온도를 추출하여 비교하였고, 같은 구간의 온도그래프를 그려 두 그래프의 차이를 분석하였다. 무인항공기는 세분류 토지피복도 수준에서 피복별 온도를 취득하는 것이 가능하였다. 하지만 Landsat 8은 해상도가 낮아 세분류보다는 대분류 토지피복 수준에서 피복별 온도를 취득하는 것이 적절하였다.

무인항공기 열적외 영상의 최고온도는 51.2℃, 최저 온도는 24.2℃이며, 고온역의 대부분이 건물의 옥상으로 시가화 지역에 속한 부분이었다. 저온역은 소라산 자연마당 녹지에 해당하는 부분으로 녹지의 유형에 따라서도 온도 차이가 있는 것으로 확인되었다. Landsat 8의 경우, 최고 온도는 34.0℃, 최저 온도는 26.2℃로 확인되어 녹지가 분포하고 있는 지역의 지표온도가 주변 지역보다 낮은 것만을 확인할 수 있었다. 원격탐사에 의해 측정된 온도는 방사율을 통해 온도를 추정하는 방식으로 실제 온도계를 대상물에 접촉시켜 측정한 온도와 차이가 있으며(Lee and Jo, 2004), 해상도에 따른 차이로 인해 두 영상의 온도 범위에 차이가 발생한 것으로 판단되었다. 열적외 영상의 온도분포 차이는 센서의 해상도가 가장 큰 영향을 미치는데, Landsat-8 TIR 영상(band 10, 11)의 기본 해상도는 100m이며, 30m급 영상으로 보간되어 제공되고 있다. 즉, 무인항공기 열적

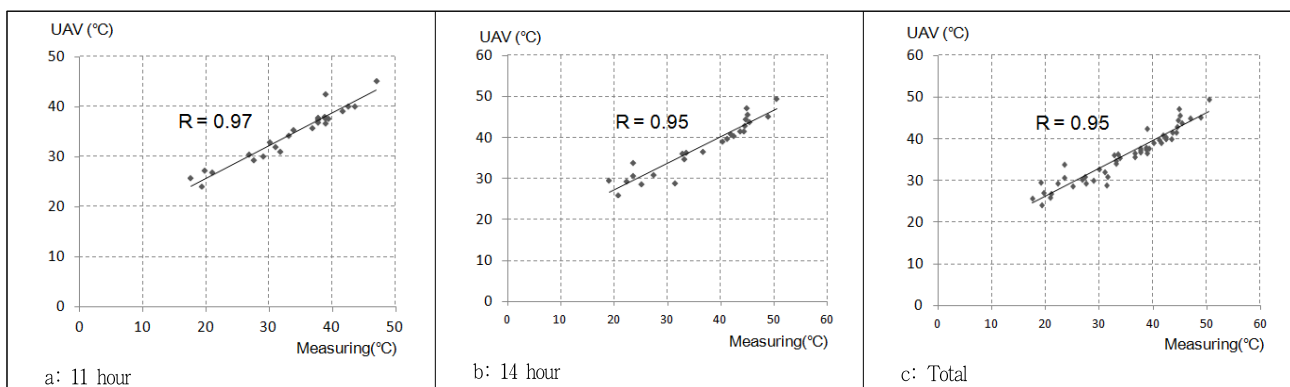


Figure 7. Correlation analysis result of UAV and measuring

의 영상(30cm)의 경우, 단위 픽셀당 측정할 수 있는 토지피복의 유형이 매우 다양하므로 온도 분포 범위도 넓게 나타난 것으로 볼 수 있다(Figure 8 참조).

토지 피복별 지표온도의 평균값의 차이를 비교한 결과, 시가화 지역 4.6℃, 산림 1.6℃, 초지 0.8℃, 나지 0.5℃, 농업지역 0.3℃로 시가화 지역의 온도 차이가 가장 높은 것으로 나타났다. Landsat 8 영상에서 추출한 시가화 지역 지표온도의 평균값은 31.7℃이었으며, 무인항공기는 36.3℃으로 무인항공기에서 추출한 온도 값이 더 높았다. 상업·업무시설이나 단독주거시설, 교육·행정시설과 같이 지표온도 값이 39℃이상으로 나타나는 지역의 면적 비가 16.9%로 전체 시가화 지역 중 약

40%를 차지하였기 때문인 것으로 판단된다(Table 6 참조). 또한 Landsat 8의 셀 단위가 크기 때문에 단독주거시설과 같이 지표온도가 높지만, 면적이 크지 않은 세밀한 피복의 지표온도를 반영하지 못한 것으로 판단된다. 두 번째로 높은 차이를 보이는 토지 피복 유형인 산림의 지표온도의 평균값은 Landsat 8 영상에서 27.7℃이었으며, 무인항공기 영상에서 26.1℃으로 Landsat 8에서 추출한 지표온도 값이 더 높게 나타났다. 이는 산림지역 주변 인공피복지역을 포함해 계산되어 이러한 결과가 나타난 것이라 판단된다.

무인항공기와 Landsat 8 열적외 영상의 같은 구간의 온도 그래프를 작성하고, 두 그래프의 차이를 비교하였다. 그 결과,

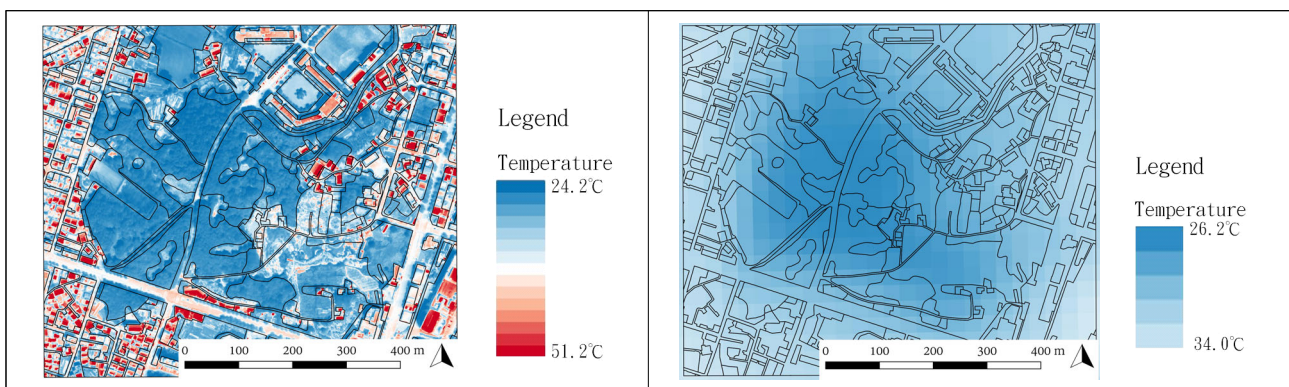


Figure 8. LST map of study site according to image

Table 6. Surface temperature by land cover classification

Low-level land cover classification	Temperature (°C)			High-level land cover classification	Temperature (°C)	Area ratio(%)
	Landsat 8	UAV	Difference		UAV	
Used area	31.7	36.3	4.6	Individual residential facilities	39.6	9.3
				Residential facilities	38.1	1.3
				Industrial facilities	32.2	0.2
				Commercial·business facilities	40.2	5.1
				Cultural·sports·recreational facilities	33.2	0.3
				Road	33.6	23.0
				Education·administrative facilities	39.9	1.5
				Other public facilities	41.7	1.0
Agricultural land	29.7	29.4	0.3	Readjustment field	31.6	0.1
				Untreated field	29.4	12.6
				Orchard	29.9	0.4
Forest	27.7	26.1	1.6	Broad-leaved forest	26.7	1.5
				Conifer forest	25.9	12.7
				Mixed forest	26.5	4.5
Grass	28.7	29.5	0.8	Cemetery	27.8	2.8
				Other grass	29.8	18.2
Barren	31.3	31.8	0.5	Playground	29.1	1.4
				Other barren	33.1	4.1

Landsat 8 열적외 영상은 30m단위로 일정한 값을 나타냈고, 무인항공기 열적외 영상은 30m 내에서도 뚜렷한 온도의 변화를 확인할 수 있었다. 두 개 그래프의 큰 추세는 녹지 외부공간의 지표온도가 높고 녹지공간의 지표온도가 낮게 나타나 비슷하였으나, 무인항공기 그래프의 경우 건물이나 녹지지역 내의 포장지, 가로수와 같이 세부적인 지표의 변화에 따른 온도변화도 분석되었다(Figure 9 참조). 도시지역은 인간의 이용에 적합한 공간단위 스케일로 구성되어 세부적인 지표 변화가 많으며, 그에 따라 지표온도 변화도 다양하였다.

3. 도시 내 열환경 분석에서 무인항공기의 적용 가능성

수관으로부터 거리와 그림자 유무에 따른 지표온도를 분석하였다. 그 결과, 그림자를 도로로 드리우는 수관의 끝으로부터 1m까지 평균 온도는 29.1°C이고, 1m씩 멀어질수록 0.9~1.8°C의 지표온도가 올라 3~4m 사이의 평균 온도는 32.9°C이었다. 그림자를 드리우지 않는 수관의 끝으로부터 1m까지 평균 온도는 33.7°C이고, 1~2m사이의 평균 온도가 36.0°C로 2.3°C상승

하였지만, 그 이후로는 약 0.6~0.7°C의 폭으로 상승하였다. 그림자에 유무에 관계없이 거리가 멀어질수록 지표온도가 높아졌고, 수목이 지표온도를 낮추는 경향이 있다는 것을 알 수 있었다(Table 7, Figure 10 참조).

그림자를 통한 지표온도저감 효과를 검토한 결과, 그림자가 드리워진 도로의 지표온도가 그렇지 않은 도로보다 약 4.4~6.0°C의 지표온도가 낮았다. 가장 차이가 많이 나는 구간은 1~2m구간으로 나타났고, 선행연구에 비해 다소 높은 저감효과가 나타난 것으로 분석되었으나, 한 영상을 통해 분석한 결과 값이므로 다양한 영상들의 분석을 통한 검증이 수반되어야 한다.

IV. 결론

도시에는 다양하고 세밀한 인공적인 피복들이 혼재하여 있지만 인공위성의 낮은 해상도는 피복별 특성을 고려한 분석에 대한 한계를 가졌다. 이에 무인항공기 열적외 영상의 정확성 검증과, 도시 열환경 분석에서 무인항공기의 활용가능성에 대해 검토하고자 표면측정온도계, 무인항공기, Landsat 8의 다양한 방법으로 지표온도를 취득하여 비교하였다.

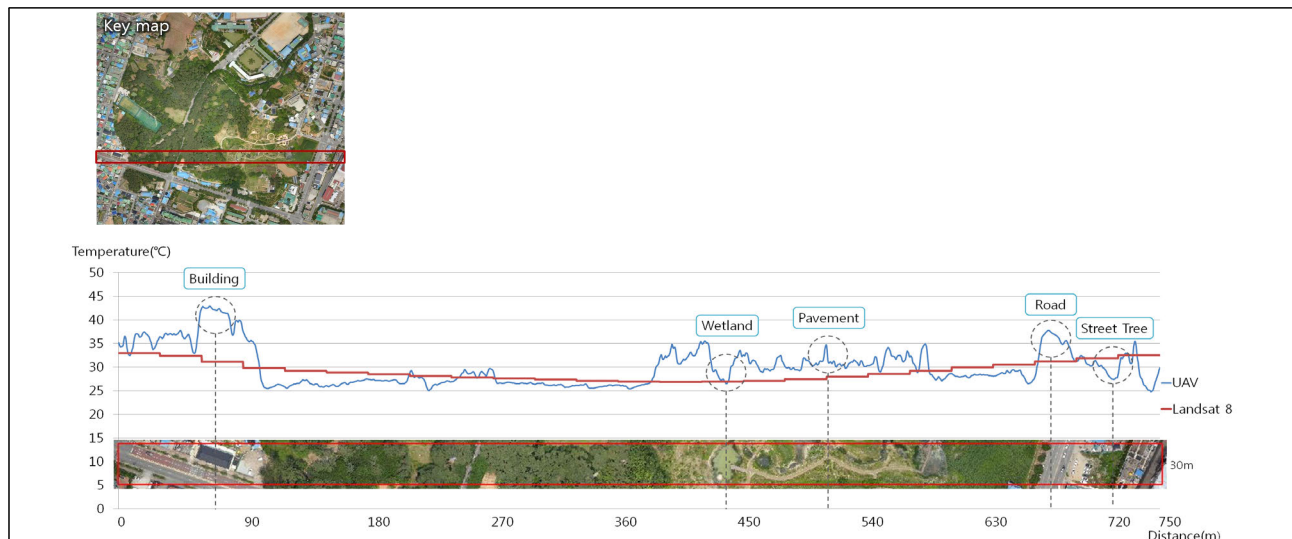


Figure 9. Graph of LST according to image

Table 7. LST on road by distance

Distance(M)	Temperature (°C)				
	Shadow	Difference ¹	Non shadow	Difference ²	Difference ³
0~1	29.1	-	33.7	-	4.6
1~2	30.0	+0.9	36.0	+2.3	6.0
2~3	31.8	+1.8	36.7	+0.7	4.9
3~4	32.9	+1.1	37.3	+0.6	4.4

1,2: Difference of temperature per distance.

3: Difference between shadow and non shadow temperature.

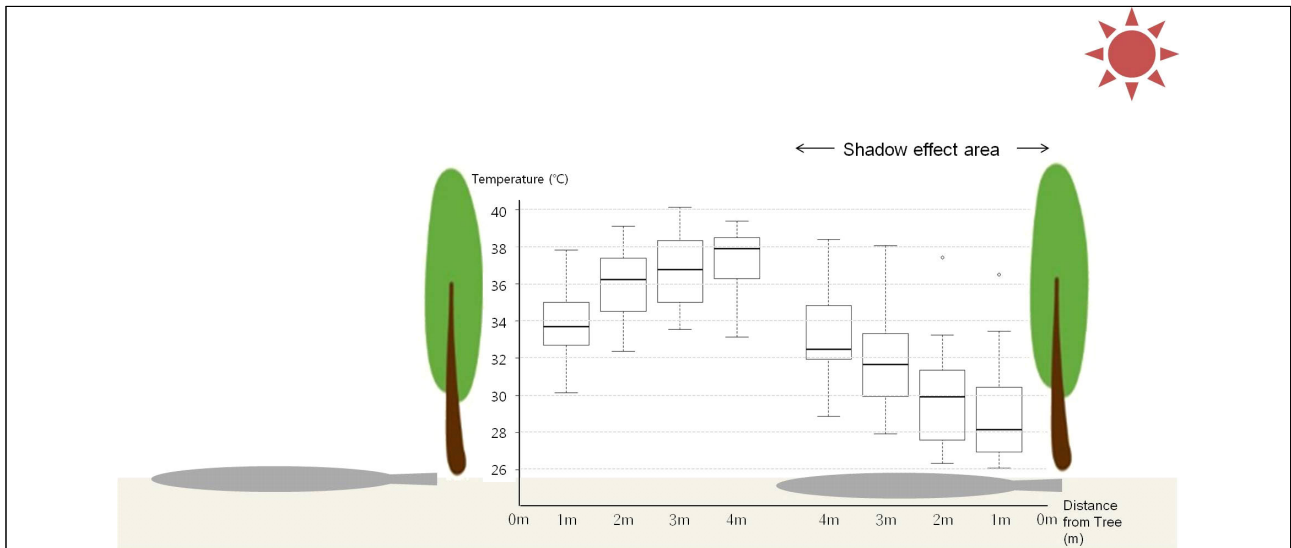


Figure 10. LST on road by distance

표면측정온도계와 무인항공기에서 취득한 온도 값은 강한 양의 상관관계를 보였고, wilcoxon분석 결과, 두 집단의 통계적 차이가 없는 것으로 나타나, 일정 면적의 지표온도를 무인항공기를 활용하여 단시간에 취득하기 용이하다는 결과를 얻었다. Landsat 8과의 해상도 차이 분석 결과, 셀 단위가 작은 무인항공기영상이 세부적인 피복의 지표온도를 반영한 분석이 가능하여 세밀한 피복을 가지고 있는 도시지역에 무인항공기는 적합한 열환경 분석 도구임을 확인하였다. 이를 적용하여 가로수 그림자의 지표온도저감 효과 분석 결과, 약 4~6°C 가량 낮은 것으로 나타났고, 무인항공기를 활용하여 그림자의 지표온도저감 효과에 대한 정량화를 시도한 점에서 의미가 있었다.

무인항공기는 단시간에 일정 면적의 지표온도를 취득하기 용이하였고, 세부적인 공간의 분석이 가능하였다. 대면적의 녹지가 입지할 공간이 부족하여 소규모 녹지의 효율적인 입지가 중요한 도시에서 무인항공기의 활용성이 높을 것으로 판단되었다. 공원 내부의 피복 재료나 수종 등 세부적 요소에 따른 열환경 평가가 가능해 공원의 조성이나 관리에도 활용될 수 있을 것이다. 또한 가로녹지, 옥상녹화, 소공원 등의 온도저감 효과 분석이 가능하므로 다양한 녹지에 관한 실증적인 연구도 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 도시 내 녹지를 대상으로 열환경 분석에서 무인항공기의 활용 가능성을 보았다. 그러나 일정 지역만을 대상으로 분석하여 도시 내 다양한 녹지의 유형에 대한 고려가 미흡하였다. 또한 열환경 분석을 지표온도로만 분석한 한계를 가졌다. 추후 도시 내 녹지에 대한 다양한 유형과 대기온도의 고려와 함께 무인항공기 영상의 시계열 자료를 통한 실측값의 비교에 대한 추가적인 연구가 이루어진다면 도시 내 열환경 분석 시 더욱 효과적으로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

References

1. Choi, T. Y., H. G. Moon and J. G. Cha(2017) Analysis of surface temperature on urban green space using unmanned aerial vehicle images: A case of sorasan Mt. Nature Garden, Iksan, South Korea. Journal of the Korea Association of Geographic Information Studies. 20(3): 90-103.
2. Du H., W. Cai, Y. Xu, Z. Wang, Y. Wang and Y. Cai(2017) Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data. Urban Forestry & Urban Greening 27: 24-31.
3. Jung, H. E., B. H. Han and J. I. Kwak(2015) A study on air temperature reduction effect and the functional improvement of street green areas in Seoul, Korea. Landscape Journal 43(4): 37-49.
4. Korea Environment Institute(2009) A Study on Strategies to Mitigate Urban Heat Island Effects as Part of Climate Change Adaptation in Urban Areas. Research Report. Urbanization. pp. 1.
5. Kim, M. K., S. P. Kim, N. H. Kim and H. G. Shon(2014) Urbanization and urban heat island analysis using LANDSAT imagery: Sejong City as a case study. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 34(3): 1033-1041.
6. Kim, S. M.(2014) Study of the UAV for application plans and landscape analysis. Journal of the Korean Institute of Traditional Landscape Architecture 32(3): 213-220.
7. Lee, H. Y. and S. C. Noh(2013) Advanced Statistical Analysis ver.2 Seoul: MoonWooSa. pp. 147-162.
8. Lee, K. J. and M. H. Jo(2004) Analysis of urban surface temperature distribution properties using spatial information technologies. Korean Journal of Remote Sensing 20(6): 397-408.
9. Lee, W. S., S. G. Jung, K. H. Park and K. T. Kim(2010) Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. Journal of the Korea Association of Geographic Information Studies 13(1): 142-154.
10. Lim, O. T.(2016) A Study on Identifying Individual Korea Fir(*Abies koreana*) Tree at Mt. Halla, Jeju, Korea, using UAV(Unmanned Aerial Vehicle) Images Method. Master's Thesis, Kookmin University, Korea.
11. Liu, L. and Y. Zhang(2011) Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong.

- Remote Sens. 3: 1535-1552.
12. Moon, H. G., S. M. Lee and J. G. Cha(2017) Land cover classification using UAV imagery and object-based image analysis: Focusing on the Maseo-myeon, Seochon-gun, Chungcheongnam-do. *Journal of the Korea Association of Geographic Information Studies* 20(1): 1-14.
 13. Milčević, D. D., I. V. Bajšanski and M. S. Savić(2017) Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways. *Urban Forestry & Urban Greening*, 23: 113-124.
 14. National Institute of Meteorological Sciences(NIMS) (2016) Calculation of Land Surface Temperature using Landsat 8 and Analysis of Urban green effect. Technical Note, pp. 3-5.
 15. Park, J. H. and G. H. Cho(2016) Influence of park size on the park cooling effect: Focused on Ilsan new town in Korea. *Journal of Korea Planning Association* 51(5):247-261.
 16. Park, J. H., J. H. Kim, D. K. Lee, C. Y. Park and S. G. Jeong(2017) The influence of small green space type and structure at the street-level on urban heat island mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening* 21: 203-212.
 17. Park, M. H., J. S. Lee and J. I. Park(2008) A relationship analysis among land surface temperature and NDVI in hampyeong bay using landsat TM/ETM+ satellite images. *Journal of Korea Cadastre Information Association* 10(2): 107-115.
 18. Soltani, A. and E. Sharifi(2017) Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. *Frontiers of Architectural Research*, 6: 529-538.
 19. United States Geological Survey(2016) LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK. Sioux Falls, South Dakota: EROS, pp.60-64.
 20. Wang, Y. and H. Akbari(2016) The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society* 27: 122-128.

Received : 25 January, 2018

Revised : 22 February, 2018 (1st)

20 March, 2018 (2nd)

Accepted : 20 March, 2018

3인익명 심사필