

Landsat-8 시계열 위성영상을 활용한 도심지 확장에 따른 열섬포텐셜 분석

Analysis of Thermal Heat Island Potential by Urbanization Using Landsat-8 Time-series Satellite Imagery

김태헌¹⁾ · 이원희²⁾ · 한유경³⁾

Kim, Taeheon · Lee, Won Hee · Han, Youkyung

Abstract

As the urbanization ratio increases, the heat environment in cities is becoming more important due to the urban heat island. In this study, the heat island spatial analysis was calculated and conducted for analysis of urban thermal environment of Sejong city, which was launched in 2012 and has been developed rapidly. To analyze the ratio and change rate of urban area, a multi temporal land cover map (2013 to 2015 and 2017) of study area is generated based on Landsat-8 OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor) satellite imagery. Then, we select an TIR (Thermal Infrared) band from the two TIR bands provided by the Landsat-8, which is used for calculating the heat island potential, through the accuracy evaluation of the brightness temperature and AWS (Automatic Weathering Station) data. Based on the selected band and surface emissivity, land surface temperature is calculated and the estimated heat island potential change is analyzed. As a result, the land surface temperature of the high ratio and change rate of urban area was significantly higher than the surrounding area around 3°C to 4°C, and the heat island potential was also higher around 4°C to 5°C. However, the heat island phenomenon was alleviated in urban areas with high rate of change that also show high green area ratio. Therefore, we demonstrated that dense urban area increases the possibility of inducing heat island, but it can mitigate the heat island through green areas.

Keywords : Urban Heat Island, Heat Island Potential, Landsat-8 OLI/TIRS, Land Cover Map, Land Surface Temperature

초 록

우리나라의 도시화 비율이 증가함에 따라 도시열섬으로 인한 도시 열 환경의 중요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 2012년에 출범하여 급속도로 발전을 이룬 세종특별자치시의 도시 열 환경 분석을 위해 열섬포텐셜을 이용하였다. 우선 도심지의 비율 및 변화율을 분석하기 위해 Landsat-8 OLI/TIRS 위성영상을 기반으로 연구지역의 시계열 토지피복도(2013년~2015년, 2017년)를 생성하였다. 그리고 취득된 위성영상에서 제공하는 두 가지 열적외선 밴드에서 산출된 밝기온도와 자동기상관측망 자료와의 정확도 평가를 통해 연구에 활용할 밴드를 선정하였다. 선정된 밴드와 지표면 방사율을 고려하여 지표면온도를 산출하였으며, 이를 기반으로 산출된 열섬포텐셜 변화분석을 수행하였다. 분석결과, 연구지역의 행정구역별 도심지 변화율이 크게 관측되는 지역의 지표면온도는 주변지역 보다 3°C~4°C 높고, 열섬포텐셜 또한 4°C~5°C 높게 관측되었다. 하지만 도심지 변화율이 크고 녹지의 비율이 높은 지역에서는 열섬현상이 완화되는 경향을 보였다. 이를 통해 면적대비 도심지가 차지하는 비율이 높아지면 열섬을 유발할 가능성이 증가하지만 녹지를 통해 열섬을 완화시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

핵심어 : 도시열섬, 열섬포텐셜, Landsat-8 OLI/TIRS, 토지피복도, 지표면온도

Received 2018. 07. 27, Revised 2018. 08. 09, Accepted 2018. 08. 29

1) Dept. of Geospatial Information, Kyungpook National University (E-mail: rlxogjs73@knu.ac.kr)

2) Member, School of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University (E-mail: wlee33@knu.ac.kr)

3) Corresponding Author, Member, School of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University (E-mail: han602@knu.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

과거 산업화가 진행되면서 이촌향도 현상으로 인해 도시로 인구가 집중되어 급격한 도시화가 진행되었다. 도시화가 진행되면 도시 내에 주거, 상업, 공공시설 등의 인공구조물이 증가함으로써 냉각 효과를 담당하는 녹지가 감소하고 인공 열과 대기오염 물질로 인해 도시 상공의 기온이 주변 지역보다 높아지는 도시열섬 현상이 발생한다. 도시열섬이란 일반적으로 도심지 변화지역이 주변 교외 지역보다 온도가 높게 측정되는 현상을 말한다(Kim and Yeom, 2012). 도심지를 구성하고 있는 아스팔트 및 콘크리트 포장 면은 알베도(albedo)가 낮아 많은 양의 태양복사 에너지를 흡수함으로써 지표 부근의 열에너지를 누적시키고, 또한 햇빛을 반사하고 흡수하는 면적이 증가하는 초고층 건물의 증축으로 지표면 온도가 증가하여 열섬현상이 발생한다. 그리고 공장 및 자동차 매연으로 인해 발생하는 스모그가 대기의 열을 저장하여 다시 방출하기 때문에 악순환이 반복되며 세계적으로 문제시되고 있는 지구온난화에도 큰 영향을 미치고 있다.

도시열섬현상은 인간이 생활함에 있어 전반적으로 큰 영향을 미치고 있으며, 이러한 도시열섬의 문제점을 분석하고 해결하기 위한 연구가 국내외에서 다양하게 진행되고 있다. 정규식생지수(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index), 정규수분지수(NDWI: Normalized Difference Water Index)와 지표면온도(LST: Land Surface Temperature)간의 상관관계 분석(Weng *et al.*, 2004), IKONOS 영상 기반의 토지피복도와 Landsat TM/ETM (Thematic Mapper / Enhanced Thematic Mapper) 영상기반의 NDVI, 정규시가화지수(NDBI: Normalized Difference Build-up Index) 그리고 LST와의 관계를 이용한 도시열섬 분석(Chen *et al.*, 2006), Landsat 영상 기반의 도시지역지수(UI: Urban Index)와 온도변동지수(TVI: Temperature Variation Index)를 이용한 도시열섬 연구(Kim *et al.*, 2014b)가 진행되었다. 또한 피복별 알베도 분석을 통한 도시열섬원인 분석(Maclachlan *et al.*, 2017), 지표면온도와 자동 기상관측망(AWS: Automated Weather Station) 자료를 함께 활용하여 밴드별 지상기온분포도를 제작(Ku, 2014), 녹지 주차장을 활용한 도시열섬 완화에 관한 연구(Onishi *et al.*, 2010), 열섬 현상 완화를 위한 도심지를 구성하고 있는 건축 자재 및 건물 외관에 다양한 녹지를 적용방안에 대한 연구(Aflaki *et al.*, 2017) 등이 있다.

도시열섬 현상에 관한 심도 깊은 연구를 위해 토지피복 특성에 따라 열섬발생 가능성을 정량적으로 평가하기 위한 열섬포텐셜(HIP: Heat Island Potential) 개념이 제안되었다

(Ichinose *et al.*, 1994). 지표와 대기간의 현열교환량을 산정하는 지표인 열섬포텐셜은 다방면에서 활용되고 있으며, 위성영상을 활용하여 산출할 수 있다(Lino and Hoyano, 1996). Landsat TM 영상을 활용하여 산출된 열섬포텐셜 기반 피복별 열섬발생가능성 분석(Ahn *et al.*, 2007), Landsat ETM+ 영상을 활용하여 피복변화에 따른 열섬포텐셜 변화분석(Ahn *et al.*, 2012), 피복별 열섬포텐셜 분석을 통한 열섬현상 완화에 관한 연구(Hashida *et al.*, 2017) 등을 통해 열섬포텐셜은 도시열섬 분석에 효과적으로 활용될 수 있는 지표라는 것이 증명되었다.

기존에 위성영상 기반의 열섬포텐셜을 활용한 연구는 Landsat TM과 Landsat ETM+영상을 기반으로 진행되었다. 하지만 Landsat TM 영상은 열적외선(thermal Infrared) 밴드 영상의 해상도가 120m로 낮고 Landsat ETM+ 영상은 SLC-off (Scan Line Corrector Failure) 문제로 인해 데이터로서의 활용가치가 떨어진다. 또한 산출된 열섬포텐셜은 지표면 방사율을 고려하지 않아 오차를 포함하고 있다. 위와 같은 문제점을 보완하고 개선하기 위해 본 연구에서는 Landsat-8 OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor) 영상을 기반으로 도심지 확장에 따른 열섬포텐셜 분석을 진행하였다. 이를 위해, 전처리과정을 거친 영상을 기반으로 토지피복도를 생성하였다. 그 후 열적외선 밴드인 Band 10(10.60 μm - 11.19 μm), Band 11(11.50 μm - 12.51 μm)에서 각각 산출된 밝기온도와 AWS 자료와의 정확도 분석을 통해 선정된 밴드를 기반으로 지표면방사율을 고려하여 지표면온도를 산출하였다. 생성된 데이터를 바탕으로 열섬포텐셜을 산출 후 도심지 확장에 따른 열섬포텐셜과의 관계를 분석하였다.

2. 연구지역 및 자료

대한민국 중앙부에 위치하고 있는 세종특별자치시는 국토균형발전의 가치를 실현하고 수도권의 행정중심과밀화를 해결하기 위해 충청남도 연기군 전체와 공주시 일부, 충청북도 청원군 일부를 편입하여 2012년 7월에 출범한 행정중심복합도시이며 행정구역은 1읍 9면 14동 125리로 구성되어있다. 출범 이후 급격한 도시개발로 인해 도심지가 증가하여 그 결과 출범 당시의 인구는 약 11만 명이었지만 급속도로 인구가 유입되어 2018년 측정 기준 약 30만 명을 달성하였다(Sejong City, 2018). 앞에서 언급한 내용을 비추어 볼 때 지속적인 인구유입이 예상되며 단기간 도시개발로 인한 도심지증가로 열섬현상이 심화될 것으로 판단되어 연구대상지를 세종특별자치시로 선정하였다(Fig. 1).

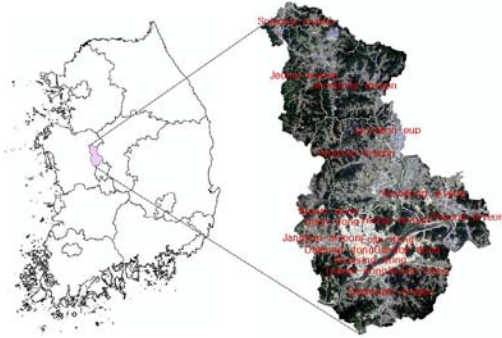


Fig. 1. Study area in Sejong city

본 연구에서는 2013년 2월 11일에 발사되어 운용 중인 Landsat-8 OLI/TIRS 위성영상을 활용하였다. Landsat ETM+ 위성과는 달리 Landsat-8 위성은 OLI와 TIRS의 두 개의 센서가 장착되어 VNIR (Visible and Near Infrared) 및 TIR 대역의 위성영상을 제공한다. 그리고 가시광선 파장대역의 공간해상도는 기존의 Landsat ETM+에서 제공하는 가시광선 파장대역의 공간해상도(30m)와 동일하며 열적외선 파장대역의 영상의 공간해상도는 100m로 Landsat ETM+에서 제공하는 열적외선 파장대역의 공간해상도인 60m에 비해 줄어들었지만, Band가 2개로 증가하였다.

일반적으로 도시열섬 연구는 냉방기 및 인공구조물의 특성으로 인해 도시열섬 현상이 가장 두드러지는 여름철 데이터를 기반으로 진행되었다. 하지만 여름뿐만 아니라 봄, 가을, 겨울에도 도시열섬이 발생하며(Kim *et al.*, 2014a), 본 연구에서는 구름이 연구지역을 덮고 있는 시기의 영상은 제외하였다. 그 결과 5월 말에서 6월 초의 시계열 영상을 바탕으로 연구를 진행하였다(Table 1).

기상청에서 제공하는 AWS 자료는 도시 열 환경 분석 및 다양한 분야에서 기초자료로써 활용되고 있다. 본 연구에서 AWS 자료를 활용하기 위해 연구지역에 설치되어 있는 AWS

자료를 취득하였다. 취득된 정보는 Table 2와 같으며 온도 측
Table 1. Information of Landsat-8 imagery used in the study

Acquisition date	Acquisition time	Cloud cover rate(%)	Path/ Row	Datum
2013.06.05	11:07:04	2.97	115/35	WGS 84
2014.05.30	11:10:22	0.46	116/35	
2015.05.26	11:04:04	0.09	115/35	
2017.05.22	11:10:41	3.36	116/35	

정시간은 Table 1에 나와 있는 위성영상 취득 시간과 동일한 시간에 측정된 온도를 활용하였다.

3. 연구 방법

영상을 활용함에 있어 지표면의 특성에 따라 방사되는 에너지, 센서의 오차와 조도 및 대기의 조건에서 발생하는 노이즈를 보정하기 위해 반사 및 방사보정을 수행 후 시계열 토지 피복도를 구축하였다. 그리고 Landsat-8 OLI/TIRS의 열적외선 밴드인 Band 10, Band 11을 기반으로 지표면온도를 산출하였고, 데이터의 효율성을 높이기 위해 AWS 자료와 지표면 온도간의 평균제곱근오차(RMSE: Root Mean Square Error)를 활용한 정확도 평가를 통해 밴드를 선정하였다. 그 후 정확도가 높은 밴드를 선별하여 열섬포텐셜 산출 후 분석하였다.

3.1 영상의 전처리 및 토지피복분류

취득된 영상은 지표의 특성 및 센서의 오차가 보정되지 않아 오차를 포함하고 있는 DN (Digital Number)값으로 표현된다. 이러한 취득된 영상의 DN 값을 전처리 과정을 거쳐 보정된 반사도 값으로 변환하기 위해 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 User handbook의 Eqs. (1) and (2)를 이용하였다(USGS, 2016). Eq.

Table 2. Information of AWS data used in the study

Installation area of AWS	Temperature of AWS (°C)				Latitude	Longitude	Datum
	2013	2014	2015	2017			
Sejong_jeonui	26.9	27.5	25.9	23.9	36°41'26"	127°12'01"	WGS 84
Sejong_yeonseo	25.7	27.4	24.9	24.1	36°34'19"	127°17'01"	
Sejong_yeongi	26.8	27.4	24.8	25.1	36°30'11"	127°17'28"	
Sejong_geumnam	26.6	27.6	24.7	24.2	34°57'02"	127°51'32"	

(1)은 태양의 고도 각을 고려하지 않은 결과 값이므로 실질적인 반사도 데이터로 활용할 수 없지만, Eq. (2)를 통해 태양의 고도 각을 고려하여 계산한 영상의 반사도 값을 얻을 수 있다.

$$\rho\lambda' = M_p \times DN + A_p \quad (1)$$

$$\rho TOA_\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin\theta_s} \quad (2)$$

where $\rho\lambda'$ is the TOA planetary spectral reflectance without correction for solar angle, M_p is the reflectance multiplicative scaling factor for the band from metadata, DN is the original pixel value, A_p is the reflectance additive scaling factor for the band from metadata, ρTOA_λ is the TOA planetary reflectance, and θ_s is the solar elevation angle from metadata.

$\rho\lambda'$ = TOA planetary spectral reflectance without correction for solar angle,

M_p = Reflectance multiplicative scaling factor for the band from metadata,

DN = Original pixel value,

A_p = Reflectance additive scaling factor for the band from metadata,

ρTOA_λ = TOA planetary reflectance,

θ_s = Solar elevation angle from metadata.

위의 Eqs. (1) and (2)를 통해 취득된 반사도 값을 이용하여 토지피복도를 생성하였다.

토지피복도는 특정시기의 토지피복 상태를 나타내며, 변화 과정과 원인을 이해하기 위한 기초자료로써 활용된다(Park and Baek, 2009; Park and Kim, 2014). 토지피복도를 생성하기 위해 통상적으로 정확도가 높다고 알려진 SVM(Support Vector Machine) 감독분류기법을 사용하였다. 기계학습분야 알고리즘 중 하나인 SVM 기법은 패턴 인식, 자료 분석을 위한 지도학습 모델이며, 분류와 회귀 분석을 위해 사용한다. Huang *et al.* (2002)은 SVM 기법과 다른 감독분류 알고리즘들과의 비교분석을 통해 SVM 기법의 성능이 뛰어나다는 것을 확인하였다. 이러한 SVM 기법을 위성영상에 적용하여 토지피복을 분류하기 위해 커널함수(Kernel function)를 활용한 비선형 분리가 이루어 져야한다(Choi *et al.*, 2006). 커널 함수에는 여러 종류가 있지만 그 중 가장 많이 활용되고 있는 RBF (Radial Basis Function) 커널을 활용하여 Training data를 추출 후 피복분류를 시행하였다. RBF 커널 함수 적용 시 결정계수를 조정하는 매개변수 γ 값은 0.33으로 설정하여

SVM 기법을 적용하였다.

연구지역의 시계열 토지피복도의 피복종류는 2014년 4월에 환경부에서 발행한 중분류 토지피복도의 피복종류를 바탕으로 분류 시 분광특성이 유사한 종류끼리 통합하여 분류를 진행하였다. 중분류 토지피복도의 주거, 공업, 상업, 교통, 공공시설지역은 도심지로 논, 밭, 시설재배지, 과수원, 기타재배지는 농경지로 활엽, 침엽, 혼효림은 산림으로 자연초지와 인공초지는 초지로 내륙, 연안 습지와 자연, 인공 나지는 나지로 내륙수와 해양수는 수계로 통합 하여 총 6종류로 분류하였다.

3.2 지표면온도

Landsat-8 OLI/TIRS 영상은 기존의 Landsat TM, Landsat ETM+와 달리 두 개의 열적외선 밴드를 제공하기 때문에 Band 10, Band 11을 활용하여 지표면 온도를 각각 산출하였다. 지표면온도를 산출하기에 앞서 영상의 DN값을 위성의 관측 센서에 도달하는 복사량으로 산출하기 위하여 NASA에서 제공하는 User handbook의 Eq. (3)을 활용하여 계산하였다.

$$L_\lambda = M_L \times DN + A_L \quad (3)$$

where L_λ is the band spectral radiance ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$), M_L is the radiance multiplicative scaling factor for the band from metadata, and A_L is the radiance additive scaling factor for the band from metadata.

L_λ = Band spectral radiance ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$),

M_L = Radiance multiplicative scaling factor for the band from the metadata,

DN = Original pixel value,

A_L = Radiance additive scaling factor for the band from the metadata.

산출된 복사량을 바탕으로 Eq. (4)를 통해 밝기온도를 계산할 수 있다. 여기서 열 밴드가 Band 10, Band 11로 나뉘기 때문에 K1과 K2의 분광방사휘도와 절대온도의 보정계수는 Table 3의 보정계수를 참고하여 계산하였다.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

where T is the brightness temperature, and $K1$ and $K2$

are thermal conversion constants for the band from metadata.

T = Brightness temperature,

L_{λ} = Band spectral radiance ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$),

$K1$ = Thermal conversion constant for the band from metadata,

$K2$ = Thermal conversion constant for the band from metadata.

Table 3. Thermal conversion constant of band 10 and band 11

Band	K1	K2
10	774.89	1321.08
11	480.89	1201.14

산출된 밝기온도는 지표면 방출특성이 고려되지 않은 온도이며, 지표면 방사율을 고려하여 지표면온도를 산출해주어야 한다. 지표면 방사율은 국내·외의 다양한 기관에서 제공하지만, 실제 방사율은 상이한 지표면피복, 식생, 토양수분의 시간적 변동으로 인하여 시간에 따라 급변한다(Kim *et al.*, 2018). 따라서 위성영상을 활용하여 촬영된 시간대의 지표면 방사율을 취득하기 위해 전처리 과정을 거쳐 방사보정이 수행된 영상을 활용하여 지표면 방사율을 계산하였다. 식생의 생물량에 민감하게 반응하는 근적외선밴드(Band 5)와 식생의 적색엽록소 흡수 밴드인 적색밴드(Band 4)를 Eq. (5)와 같은 방법으로 정규식생지수를 생성하였다.

$$NDVI = \frac{BAND5 - BAND4}{BAND5 + BAND4} \quad (5)$$

where $BAND4$ and $BAND5$ are the red and near-infrared bands, respectively.

$BAND4$ = Red band,

$BAND5$ = Near infrared band .

이를 바탕으로 Van de Griend and Owe (1993)의 연구결과에서 제시된 $1.0094 + 0.047 \ln(NDVI)$ 관계에 따라 Zhang *et al.*,(2006)이 열 환경 분석에 적용시키기 위해 완성시킨 Table 4의 내용을 바탕으로 방사율을 산출하였다(Kim *et al.*, 2014b; Kim *et al.*, 2018).

Table 4. Emissivity values corresponding to NDVI ranges (Zhang *et al.*, 2006)

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

Landsat-8 OLI/TIRS 영상의 DN값을 바탕으로 산출된 밝기온도 값과 NDVI를 이용하여 계산된 지표면 방사율을 이용하여 Eq. (6)을 통해 지표면온도를 산출하였다. 산출된 지표면온도는 절대온도로 표현되기 때문에 섭씨온도로 변환해주기 위해 273.15를 빼주어 계산하였다.

$$T_s = \epsilon^{1/4} T \quad (6)$$

where T_s is the land surface temperature ($^{\circ}C$) and ϵ is the land emissivity.

T_s = Land surface temperature ($^{\circ}C$),

ϵ = Land emissivity,

T = Brightness temperature.

Band 10과 Band 11에서 산출된 지표면온도는 서로 다른 파장대로 인해 Band 11이 Band 10보다 대기의 영향을 많이 받아 온도가 다소 낮게 측정되는 경우가 있다(Yale, 2016). 본 연구에서는 효율적인 밴드를 선정하여 연구를 진행하기 위해 AWS 기온과 지표면 방사율을 고려하여 산출된 지표면온도 사이에는 밀접한 관계성이 있다(Lee *et al.*, 2009)는 선행 연구결과를 바탕으로 AWS 데이터와 각각의 Band를 기반으로 계산된 지표면온도간의 정확도 평가를 실시하였다(Table 5). 지표면온도와 AWS 값의 차이가 발생하는 가장 큰 이유는 두 온도를 추정하는 대상의 차이 때문이다. 즉, 지표면온도는 지표에서 방출되는 열을 측정된 데이터이고 AWS는 대기 기온을 측정된 데이터이기 때문에 값의 차이가 발생한다. 또한 Landsat 열적외영상의 낮은 공간해상도로 인해 AWS 데이터 측정 지점과 정확히 일치하는 위치의 지표면온도를 추정하지 못했기 때문에 오차가 발생한 것으로 판단된다. 정확도 결과를 보아 Band 11의 RMSE값이 Band 10에 비해 전반적으로 작은 것으로 분석되어 Band 11을 기반으로 계산된 지표면 온도를 열섬포텐셜 계산에 활용하였다.

Table 5. Accuracy comparison of temperature estimated by band 10 and band 11 of Landsat-8 TIRS (unit: °C)

Date	Location of measurement	AWS	Band 10		Band 11	
			LST	RMSE	LST	RMSE
2013.06.05	Jeonui	26.9	28.1	0.63	24.2	3.46
	Yeonsoo	25.7	25.7		22.3	
	Yeongi	26.8	27.2		23.1	
	Geumnam	26.9	26.8		23.0	
2014.05.30	Jeonui	27.5	36.3	6.45	33.0	3.79
	Yeonsoo	27.4	30.8		28.5	
	Yeongi	27.4	34.0		31.2	
	Geumnam	27.6	33.4		31.0	
2015.05.26	Jeonui	25.9	37.4	8.74	35.6	7.09
	Yeonsoo	24.9	29.9		28.4	
	Yeongi	24.8	34.0		32.3	
	Geumnam	24.7	32.7		30.9	
2017.05.22	Jeonui	23.9	29.2	6.17	25.2	3.39
	Yeonsoo	24.1	27.9		25.1	
	Yeongi	25.1	32.9		29.9	
	Geumnam	24.2	31.2		28.7	

3.3 열섬포텐셜

열섬포텐셜은 지표와 대기간의 현열 교환량을 산정하는 것이다. 지표에서 대기로 운반되는 현열 교환량을 산정하기 위한 현열속(sensible heat flux)은 Eq. (7)을 활용하여 산출할 수 있다.

$$Q = \frac{\int_{all\ urban\ surfaces} acs(T_s - (T_a + T_a'))dsi}{S} \quad (7)$$

where Q is the sensible heat flux (W/m^2), acs is the heat transfer coefficient ($W/(m^2K)$), T_s is the surface temperature (K), T_a is the average air temperature in an urban canopy layer (K), T_a' is the difference between local and average air temperatures (K), dsi is each constituent surface area (m^2), and S is the total horizontally projected surface area (m^2).

Q = Sensible heat flux (W/m^2),
 acs = Heat transfer coefficient ($W/(m^2K)$),

T_s = Surface temperature (K),

T_a = Average air temperature in an urban canopy layer (K),

T_a' = Difference between local and average air temperatures (K),

dsi = Each constituent surface area (m^2),

S = Total horizontally projected surface area (m^2).

산출된 현열속은 현열량 값이 클수록 열섬 발생 가능성이 높다는 것을 의미한다. 하지만 현열속을 산출하기 위해서는 지표면온도와 기온과의 온도차와 대류열전달율을 취득하여 산출하기 때문에 어려움이 있다.

이를 해결하기 위해 1) 도시 Canopy 층 내부 기온의 공간 부포는 수 °C의 범위에 있어 무시할 수 있고, 2) 지표면에 있어 대류열전달율의 공간분포는 작기 때문에 공간분포는 고려하지 않는다는 선행연구에서 활용된 가정을 바탕으로 식을 단순화 시켜 현열 교환량을 산출할 수 있다(Iino and Hoyano, 1996; Ahn *et al.*, 2012). 이 두 가정은 일반적으로 받아들여지는 것이며, 이를 통해 제안된 Eq. (8)을 통해 산정되는 값을 열섬포텐셜이라고 한다.

$$HIP = \frac{\int_{all\ urban\ surfaces} (T_s - T_a)dsi}{S} \quad (8)$$

where HIP is the heat island potential (°C), T_s is the land surface temperature estimated by band 11 (°C), and T_a is the average AWS temperature (°C).

HIP = Heat island potential (°C),

T_s = Land surface temperature estimated by band 11 (°C),

T_a = Average AWS temperature (°C),

dsi = Each land cover surface area (m^2),

S = Total horizontally projected surface area (m^2).

4. 연구결과

4.1 토지피복변화 분석

연구지역의 토지이용 변화를 분석하기 위해 위성영상을 기반으로 SVM 알고리즘을 적용시켜 산림, 초지, 도심지, 나지, 농경지, 수계지역으로 분류된 토지피복도는 Fig. 2와 같으며 분류정확도는 Table 6과 같다. 생성된 토지피복도는 높은 분

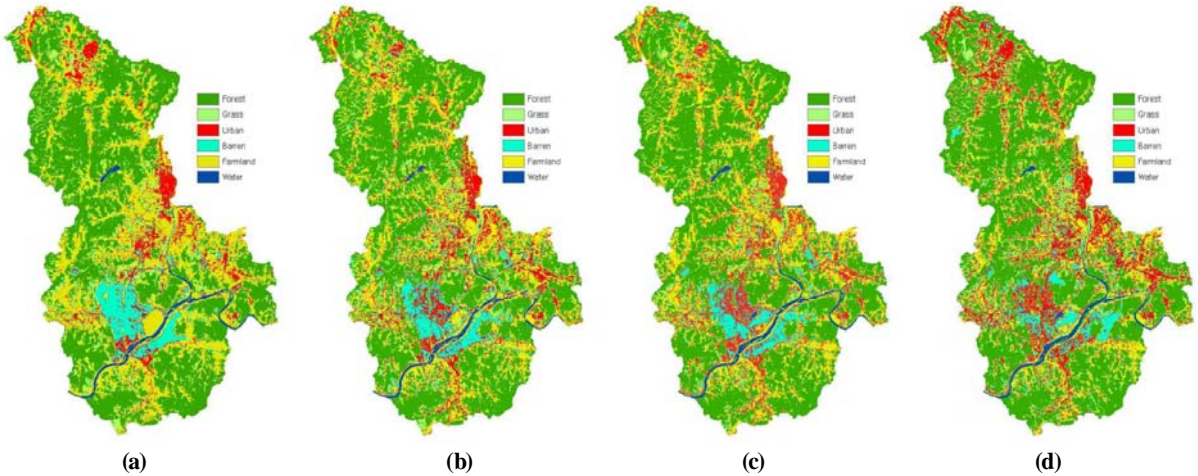


Fig. 2. Multi-temporal land cover map: (a) June 5, 2013, (b) May 30, 2014, (c) May 26, 2015, (d) May 22, 2017

류정확도를 나타내며 이를 기반으로 Fig. 3과 같은 그래프를 생성하여 정량적 분석을 실시하였다.

Table 6. Accuracy of classification result

Date	Overall accuracy (%)	Kappa coefficient
2013.06.05	93.32	0.9160
2014.05.30	88.36	0.8540
2015.05.26	91.62	0.8905
2017.05.22	90.00	0.8744

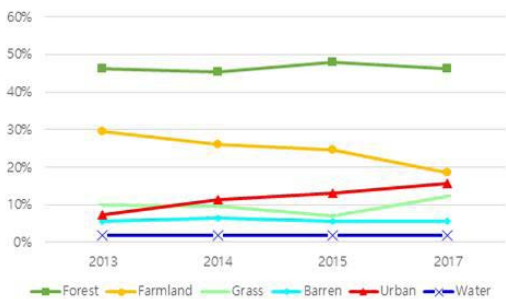


Fig. 3. Time series analysis of area changes for each land-cover class

Fig. 3에서 나타내는 그래프를 비추어 보면 산림, 수계, 나지는 연구지역 전체면적의 약 46%, 2%, 5%를 유지하고 있다.

도시지는 7.3%(2013년)에서 15.8%(2017년)로 8.5% 증가하였고, 초지는 9.9%(2013년)에서 12.1%(2017년)로 2.2% 증가하였다. 반면에 농경지는 29.4%(2013년)에서 18.4%(2017년)로 11% 감소하였다. 도시열섬 현상을 유발하는 도시지의 면적이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이에 대한 조사를 위해 연구지역을 행정구역별로 나누었고(Fig. 4), 각 행정구역에 대하여 2013년부터 2017년까지의 도시지 변화율을 Table 7과 같이 나타내었다.



Fig. 4. Administrative district of Sejong city

Table 7. Rate of urban area change from 2013 to 2017 by administrative district of Sejong city

Administrative district of Sejong city	Rate of urban area change (%)
Area_S1	26.58
Area_S2	22.98
Jochiwon-eup	-0.14
Yeongi-myeon	4.00
Yeondong-myeon	13.56
Bugang-myeon	10.64
Geumnam-myeon	3.97
Janggun-myeon	8.87
Yeonseo-myeon	7.81
Jeonui-myeon	7.49
Jeondong-myeon	7.22

읍과 면을 통합하지 않고 조사하였으며, 개발지역인 14개의 동을 Area_S1(한솔동 일대의 10개 동), Area_S2(보람동 일대의 4개 동)로 통합하여 진행하였다. 연구지역의 도심지는

전체적으로 증가하였고, 특히 신도시 개발지역인 Area_S1과 Area_S2는 2013년 대비 약 20~25% 도심지가 증가한 것을 볼 수 있다. 그리고 부강면과 장군면도 2013년 대비 약 10~13% 도심지가 증가하였는데, 이는 도로의 확장 및 농경지 지역에 비닐하우스가 증가된 것이 원인으로 판단된다.

4.2 지표면온도 변화 분석

지표면온도는 지표면 특성에 따라 열 환경에 영향을 미치는 알베도, 표면복사율, 토양수분함량 등 차이가 있기 때문에 열에너지를 방출하는 양에 있어 차이가 발생한다. 토지피복에 따른 지표면온도를 분석하기 위해 Band 11을 기반으로 산출된 행정구역별 평균 지표면온도를 Table 8과 같이 나타내었다.

도심지 비율이 가장 많이 증가된 Area_S1, Area_S2 지역의 평균 지표면온도는 타 행정구역에 비해 평균적으로 약 2℃~3℃ 높게 나타났다. 그리고 기존 변화가 지역인 조치원읍의 평균 지표면온도도 Area_S1, Area_S2 지역과 유사하게 2℃~3℃ 높게 나타났다. 이는 도심지비율이 높은 지역에 도시 열섬 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 토지피복도상 산지가 높은 비율을 차지하고 있는 전의면과 소정면의 평균 지표면온도는 타 행정구역에 비해 낮게 관측되고 있다. 따라서 도심지를 구성하고 있는 지표의 낮은 알베도 및 높

Table 8. Land surface temperature for administrative district of Sejong city (unit: °C)

Administrative district of Sejong city	Land surface temperature			
	2013.06.05	2014.05.30	2015.05.26	2017.05.22
Area-S1	23.56	30.61	31.06	27.69
Area-S2	22.99	30.71	30.99	28.20
Jochiwon-eup	22.62	29.07	29.81	26.49
Yeongi-myeon	21.24	27.41	27.56	24.50
Yeondong-myeon	21.66	28.15	28.16	24.74
Bugang-myeon	21.40	27.92	27.68	24.02
Geumnam-myeon	20.65	26.27	26.32	23.91
Janggun-myeon	21.22	26.77	26.87	22.07
Yeonseo-myeon	21.30	26.96	27.69	23.04
Jeonui-myeon	20.41	25.98	27.25	19.71
Jeondong-myeon	19.95	25.38	26.24	20.08
Sojeong-myeon	20.61	26.61	27.77	18.41

은 표면 복사율로 인해 지표면온도가 높게 측정되며, 이는 대기기온을 상승시켜 열섬현상을 유발한다는 것을 알 수 있다.

4.3 열섬포텐셜 분석

토지피복특성에 따른 열섬발생 가능성을 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 5와 같이 열섬포텐셜을 생성하였다. 산출된 열섬포텐셜 중 2015년의 열섬포텐셜 값이 다른 년도에 비해 높은 값을 보이고 있다. 이는 RMSE가 높게 측정되어 발생한 오차로 볼 수 있지만, 또 다른 의미로는 낮은 대기기온에 비해 지표면온도가 높아 현열 교환량이 증가하여 열섬포텐셜 값이 크게 나타난 것으로 판단된다. 즉, 지표면온도가 기온변화에 큰 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 또한 산출된 열섬포텐셜은 도심지 변화율이 높은 Area_S1, Area_S2 지역과 도심지 비율이 높은 조치원읍의 열섬포텐셜값은 높게 관측되었다. 이를 정량적으로 분석하기 위해 산출된 시계열 열섬포텐셜과 토지피복도의 통계적 수치를 종합한 평균값을 산출하여 Fig. 6과 같은 분포그래프를 생성하였다.

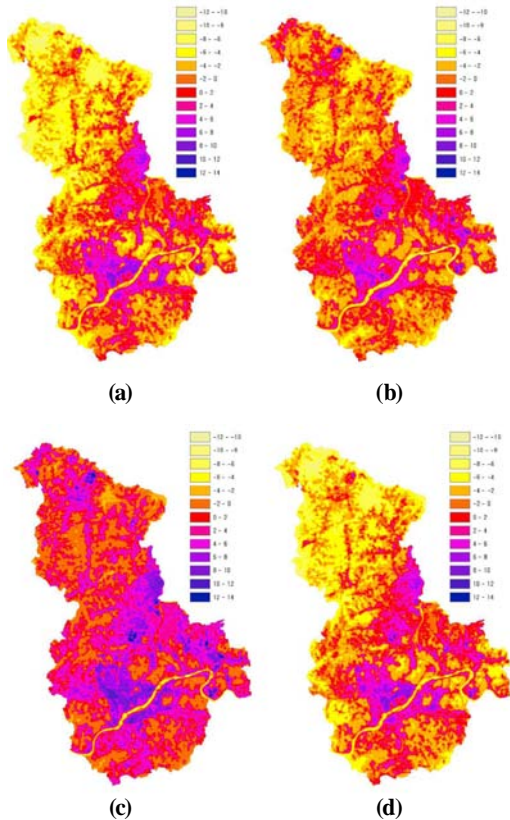


Fig. 5. Multi-temporal HIP map: (a) June 5, 2013, (b) May 30, 2014, (c) May 26, 2015, (d) May 22, 2017

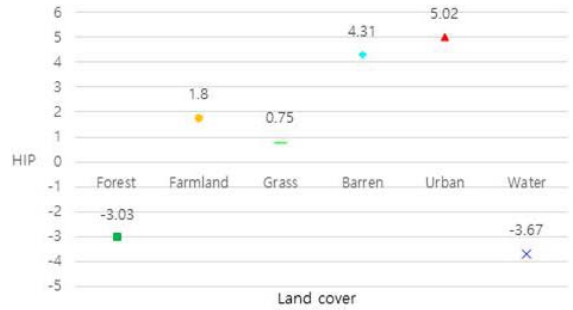


Fig. 6. Estimated average HIP of each land-cover class

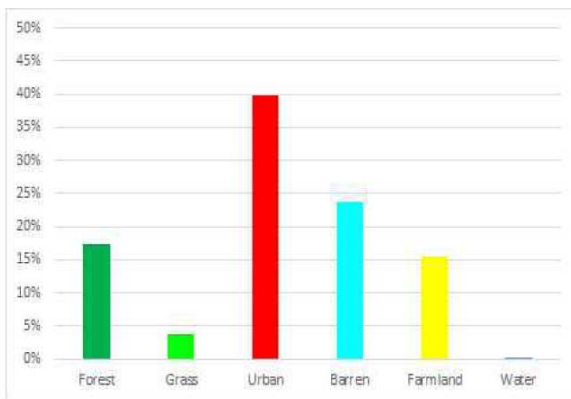
피복별로 각기 다른 열섬포텐셜값을 나타내고 있으며 다른 피복들에 비해 도심지와 나지의 열섬포텐셜 값은 각각 5.02℃, 4.31℃로 높게 관측됐다. 지표면에서 방출된 열이 도심지와 나지를 구성하고 있는 지표의 낮은 알베도로 인해 햇빛을 반사시키지 못하고 흡수 및 방출된 열이 도심지와 나지에 머물러 있기 때문이다. 산림은 주로 냉각효과를 담당하는 녹지로 구성되어 있다. 냉각효과는 주로 녹지의 증발산 작용으로 인해 대기의 온도가 냉각되는 현상을 말하며, 이러한 냉각효과로 인해 -3.03℃의 낮은 열섬포텐셜값이 측정되었다. 그리고 수계는 -3.67℃의 낮은 열섬포텐셜값이 측정되었으며, 이는 물의 특성상 높은 알베도로 인해 쉽게 가열되지 않기 때문이다. 농경지와 초지는 일반적으로 산림에 비해 녹지의 비율이 감소하여 각각 1.8℃, 0.75℃의 열섬포텐셜값이 측정되었다.

도심지확장에 따른 열섬포텐셜과의 관계를 분석하기 위해 토지피복도 기반의 도심지 비율 및 변화율, 시계열 평균 지표면온도 및 열섬포텐셜의 통계적 수치를 함께 사용하여 Table 9와 같은 표를 생성하였다.

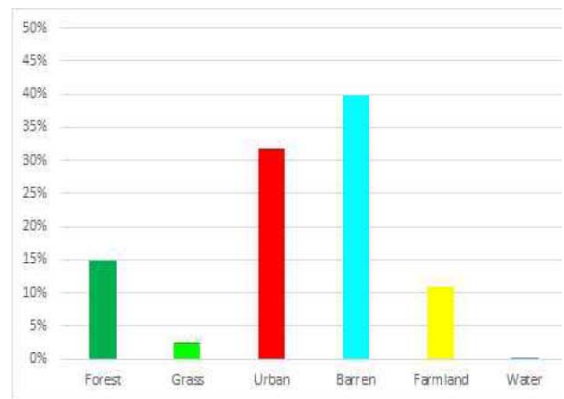
전체면적에서 도심지 비율이 30% 이상인 Area_S1, Area_S2 그리고 조치원읍은 평균 지표면온도와 열섬포텐셜은 타 지역에 비해 3~4℃ 높게 나타났다. 그 결과 도심지의 비율과 열섬포텐셜은 양의 상관관계임을 알 수 있다. 도심지 변화율과 열섬포텐셜의 관계를 분석하기 위해 도심지 변화율이 높은 Area_S1, Area_S2, 연동면, 부강면 지역의 2017년 토지피복비율을 Fig. 7로 나타내었다. Area_S1, Area_S2 지역은 도심지와 나지의 비율이 높으며 녹지인 산림, 초지 그리고 농경지의 비율은 낮다. 이로 인해, 열섬포텐셜 값이 4.01℃, 4.19℃로 크게 나타나며 열섬 발생 확률이 높다. 반대로 연동면, 부강면의 도심지와 나지의 비율은 녹지인 산림, 초지 그리고 농경지의 비율과 비슷하거나 낮게 나타나고 있다. 그 결과 열섬포텐셜 값이 1.22℃, 0.72℃로 Area_S1, Area_S2 보다 낮은 열섬포텐셜값을 보이고 있다. 증가된 도심지의 피복구성원이 대

Table 9. Relation analysis between urbanization and HIP

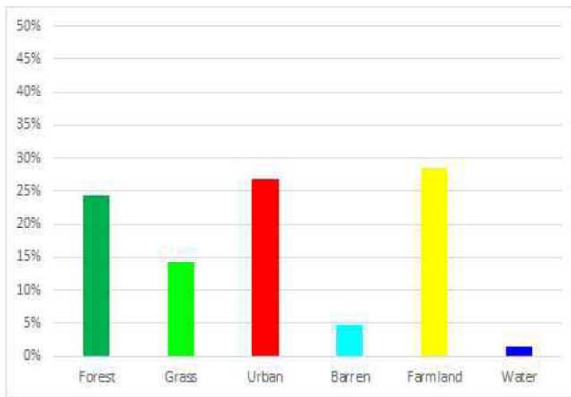
Administrative district of Sejong city	Rate of urban area to total area in 2017 (%)	Rate of urban area change between 2013 and 2017 (%)	Average LST from 2013 to 2017 (°C)	Average HIP from 2013 to 2017 (°C)
Area_S1	39.84	26.58	28.23	4.01
Area_S2	31.69	22.98	28.22	4.19
Jochiwon-eup	33.58	-0.14	27.00	2.83
Yeongi-myeon	13.88	4.00	25.18	-1.67
Yeondong-myeon	26.80	13.56	25.68	1.22
Bugang-myeon	20.05	10.64	25.26	0.72
Geumnam-myeon	6.75	3.97	24.29	-0.19
Janggum-myeon	12.55	8.87	24.23	-0.62
Yeonso-myeon	14.09	7.81	24.75	-0.01
Jeonui-myeon	14.83	7.49	23.34	-2.16
Jeondong-myeon	9.20	7.22	22.91	-1.90



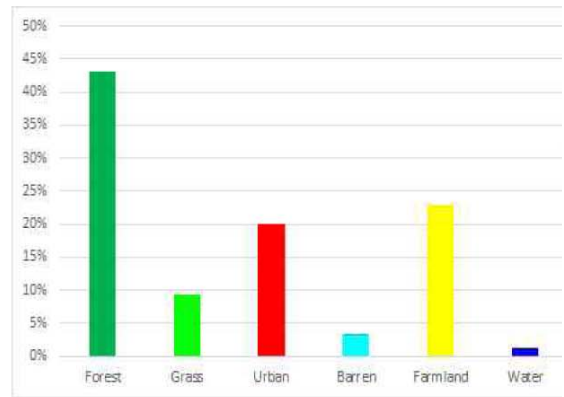
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. Comparison of land cover rate of areas in 2017 for administrative districts showing rapid urban changes: (a) Area_S1, (b) Area_S2, (c) Yeondong-myeon, (d) Bugang-myeon

부분 농경지의 비닐하우스로 추정되며, 이로 인해 녹지의 영향을 많이 받아 열섬현상이 완화된 것으로 판단된다. 단순히 지표면 온도를 활용하여 분석하였을 시 대기기온에 미치는 영향을 파악하지 못해 열섬발생 가능성을 분석하기 어렵다. 하지만 피복별 열섬포텐셜 분석을 통해 지표특성에 따른 지표면온도가 대기기온에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있었다. 분석된 연구 결과를 통해 급격한 도시화에 따른 열섬현상을 완화시키기 위해 적절한 녹지조성 사업을 통해 균형 있는 개발이 필요함을 보여주었고 있다.

5. 결론

과거 급격한 도시화로 인해 온도를 감소시키는 역할을 하고 있는 녹지가 감소하고 열섬발생 가능성이 높은 도심지가 확장되면서 도시 열 환경의 중요성에 대한 인식이 증대되고 있다. 본 연구는 기존에 발생하였던 문제점을 보완하고 개선하기 위해 도심지확장에 의한 열섬포텐셜 변화분석을 실시하였다. 우선 연구지역의 도심지 변화를 알아보기 위해 Landsat-8 영상에 SVM 알고리즘을 적용하여 토지피복도를 생성하였다. 다음으로 AWS와의 정확도 평가를 통해 선정된 밴드의 밝기온도와 지표면 방사율을 고려하여 지표면온도를 산출하였다. 그 후 열섬포텐셜을 산출하여 정량적인 분석을 통해 다음과 같은 사실을 파악할 수 있었다.

토지피복별로 열섬포텐셜의 값이 상이하게 나타나며, 이는 피복특성이 열섬발생에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 파악할 수 있다. 도심지는 열섬포텐셜값이 높아 열섬발생확률이 높고 반대로 녹지는 열섬포텐셜값이 낮아 열섬현상을 완화시키는 것으로 확인되었다. 그 결과 급격한 도시화로 인해 열섬포텐셜값이 높은 도심지 비율이 증가되면 열섬발생 확률이 증가하지만 도심지 내부에 녹지를 조성하여 열섬 현상을 완화시킬 수 있다. 하지만 도심지를 구성하고 있는 인공구조물에 따라 열섬포텐셜값이 달라지며 이는 고해상도 위성영상을 통한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 산출된 열섬포텐셜 값은 지표면방사율을 고려하였지만 다른 요소를 고려하지 못해 온도보정 알고리즘을 통한 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

연구지역인 세종특별자치시는 출범당시에는 인구 10만의 소규모 도시였지만 2018년 기준으로 인구 30만을 달성하였다. 이는 6년 동안 인구가 3배 증가하였으며 2030년까지 인구 80만을 목표로 하고 있다. 이처럼 인구가 급증함에 따라 앞으로 도시화가 진행될 것이며, 도시 열섬은 일상에 더욱 크

게 다가올 것이다. 본 연구결과를 바탕으로 세종특별자치시의 도시 관리 및 도시환경개선의 기초자료로서 활용 될 수 있을 것이며, 도시 열섬현상을 완화시키기 위해서는 지속적인 관리가 필요하다.

References

- Aflaki, A., Mirnezhad, M., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Omrany, H., Wang, Z.H., and Akbari, H. (2017), Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong kong, *Cities*, Vol. 62, pp. 131-145.
- Ahn, J.S., Hwang, J.D., Park, M.H., and Suh, Y.S. (2012), Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using Landsat-7ETM+ and AWS Data, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 4, pp. 65-77. (in Korean with English abstract)
- Ahn, J.S., Kim, H.D., and Kim, S.W. (2007), Estimation of urban heat island potential based on land use in summertime of Daegu, *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 65-71. (in Korean with English abstract)
- Chen, X.L., Zhao, H.M., Li, P.X., and Yin, Z.Y. (2006), Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 104, No. 2, pp. 133-146.
- Choi, J.W., Byun, Y.G., Kim, Y.I., and Yu, K.Y. (2006), Support vector machine classification of hyperspectral image using spectral similarity kernel, *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 14, No. 4, pp. 71-77. (in Korean with English abstract)
- Hashida, S., Omori, H., and AtsumasaYoshida, S.K. (2017), Heat island mitigation effects of various ground cover materials in and around Yokohama campus, tokyo city university, *Journal of Heat Island Institute International*, Vol. 12, pp. 54-60.
- Huang, C., Davis, L.S., and Townshend, J.R.G. (2002), An assessment of support vector machines for land cover classification, *International Journal of Remote Sensing*,

- Vol. 23, No. 4, pp. 725-749.
- Ichinose, T., Hanaki, K., and Matsuo, T. (1994), Analyses on geographical distribution of urban anthropogenic heat based on very precise geographical information, *Environmental Engineering Research*, Vol. 31, pp. 263-273.
- Ino, A. and Hoyano, A. (1996), Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data, *Energy and Buildings*, Vol. 23, No. 3, pp. 199-205.
- Sejong City (2018), Monthly statistics of Sejong city on May 2018, *Sejong Special Self-governing City*, Republic of Korea, <http://www.sejong.go.kr/stat.do> (last date accessed: 24 June 2018).
- Kim, G.H., Lee, Y.G., Kim, J.H., Choi, H.W., and Kim, B.J. (2018), Analysis of the cooling effects in urban green areas using the Landsat 8 satellite data, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, No. 2, pp. 167-178. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.O. and Yeom, J.M. (2012), Effect of the urban land cover types on the surface temperature: case study of Ilsan new city, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 2, pp. 203-214. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.S., Seok, H.B., and Kim, Y.K. (2014a), A study on the change of the urban heat island structure in Busan metropolitan area Korea, *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 11, pp. 1807-1820. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.K., Kim, S.P., Kim, N.H., and Sohn, H.G. (2014b), Urbanization and urban heat island analysis using Landsat imagery: Sejong city as a case study, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 3, pp. 1033-1041. (in Korean with English abstract)
- Ku, C.Y. (2014), Development of land surface temperature map generation method with Landsat 8 TIRS imagery and automatic weather system data, *Journal of the Korean Cartographic Association*, Vol. 14, No. 1, pp. 17-27. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., Ahn, J.S., Kim, H.D., and Hwang, S.J. (2009), Comparison study on the estimation algorithm of land surface temperature for MODIS data at the Korean peninsula, *Journal of Environmental Science International*, Vol. 18, No. 4, pp. 355-367. (in Korean with English abstract)
- Maclachlan, A., Biggs, E., Roberts, G., and Boruff, B. (2017), Urbanisation-induced land cover temperature dynamics for sustainable future urban heat island mitigation, *Urban Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 38.
- Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., and Imura, H. (2010), Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots, *Urban forestry & Urban greening*, Vol. 9, No. 4, pp. 323-332.
- Park, H.M. and Baek, T.K. (2009), Progress and land-use characteristics of urban sprawl in Busan metropolitan city using remote sensing and GIS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 12, No. 2, pp. 23-33. (in Korean with English abstract)
- Park, J.C. and Kim, J.S. (2014), Application and limitation of national land cover change detection-a case study on Chungcheongnam-do, *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, Vol. 24, No. 1, pp. 19-34. (in Korean with English abstract)
- USGS (2016), Landsat 8 data users handbook section 5, *United States Geological Survey*, <http://landsat.usgs.gov/landsat-8-18-data-users-handbook/> (last date accessed: 1 May 2018).
- Van de Griend, A.A. and Owe, M. (1993), On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No.6, pp. 1119-1131.
- Weng, Q., Lu, D., and Schubring, J. (2004), Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 89, No. 4, pp. 467-483.
- Yale (2016), Yale guide to Landsat 8 image processing, *Yale University*, <http://surfaceheat.sites.yale.edu/understanding-landsat-8/> (last date accessed: 16 May 2018).
- Zhang, J., Wang, Y., and Li, Y. (2006), A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6, *Computers & Geosciences*, Vol. 32, No. 10, pp. 1796-1805.