

시계열 Landsat 위성영상을 활용한 도시 열섬 현상 완화 방안에 관한 연구* - 청라 국제도시를 중심으로 -

백선욱¹ · 김동현² · 김형수³ · 구본엽⁴ · 정윤재^{5*}

A Study on Mitigation Plan of Urban Heat Island Phenomenon Using Landsat Time Series Imagery* - Focusing on Cheongna International City -

Seon-Uk BAEK¹ · Dong-Hyun KIM² · Hung-Soo KIM³
Bon-Yup GU⁴ · Yun-Jae CHOUNG^{5*}

요 약

간척사업을 통해 개발된 지역은 농지 및 도심지 개발 등과 같은 용지 공급 측면에서 경제적 효용가치가 크지만, 내륙에 위치하는 대도시에 비하여 상대적으로 초지 면적이 적고 건물이 밀집되어 있다는 특성이 존재한다. 이로 인해 간척사업을 통해 개발된 지역에서는 기온이 주변 지역보다 높아지는 도시 열섬 현상이 발생하고 있으며, 특히 간척사업을 통해 개발된 청라 국제도시는 도시 열섬 현상이 심화 되고 있다. 본 연구에서는 간척사업 이후 농경지 기간(2001-2008년), 개발정비 기간(2009-2013년), 인공초지조성 기간(2014-2020년)으로 분류하여 청라 국제도시의 도시 열섬 현상을 평가 및 분석하였다. 이를 위해 토지 피복도와 시계열 Landsat 위성영상을 활용하여 청라 국제도시에서 시가화 지역과 초지/산림지역의 지표면 온도 차이를 산정하였다. 시가화 지역과 초지/산림지역의 지표면 온도 차이는 농경지 기간 동안 최대 +1.05℃로 산출되었고, 개발정비 기간 동안 최대 +3.60℃로 산출되었으며, 인공초지 조성 기간 동안 최대 +2.51℃로 산출되었다. 본 연구결과를 통해 간척사업이 진행된 청라 국제도시에서 시가화 지역 면적이 증가할 때 도시 열섬 현상이 증가되며, 인공초지 면적이 증가할 때 도시 열섬 현상이 저감됨을 확인하였다. 본 논문

2022년 08월 02일 접수 Received on August 02, 2022 / 2022년 08월 29일 수정 Revised on August 29, 2022
/ 2022년 09월 06일 심사완료 Accepted on September 06, 2022

* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: 22NSPS-C152368-05).

1 인하대학교 스마트시티공학과 석사과정 Master's Course, Dept. of Smart City Engineering, Inha University

2 인하대학교 스마트시티공학과 박사수료 Ph.D. Candidate, Dept. of Smart City Engineering, Inha University

3 인하대학교 사회인프라공학과 교수 Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University

4 ㈜지오씨엔아이 공간정보솔루션센터 전무이사 Executive Director, Spatial Information Solution Center, Geo C&I Co., Ltd.

5 ㈜지오씨엔아이 공간정보기술연구소 연구소장 CTO, Geospatial Research Center, Geo C&I Co., Ltd.

※ Corresponding Author E-mail: chyj@geocni.com

의 결과는 도시계획에 있어 도시 열섬 현상 문제를 파악하고 저감 계획 수립을 위한 기초연구 자료로 활용될 수 있다.

주요어 : 도시 열섬 현상, 토지 피복도, 시계열 Landsat 위성영상, 지표면온도

ABSTRACT

Areas developed through land reclamation projects have huge economic advantages in terms of supplying lands that can be used for farmlands, urban areas and etc., however have relatively small areas of grasslands and densely located buildings compared to inland cities. Hence, an urban heat island is occurring in these areas due to this characteristic, and in particular, the urban heat island in Cheongna International City is getting serious. In this study, the urban heat island in Cheongna International City was evaluated and analyzed by classified into the three periods after the reclamation project: farmland(2001–2008), development(2009–2013) and artificial grassland(2014–2020). The land cover map and Landsat time-series imagery were utilized for measuring the differences of the land surface temperatures between the urbanized areas and the grassland/forest areas in Cheongna International City. The statistical results showed that the differences in the land surface temperature between these areas were calculated to be at most 0°C during the period of farmland, at most 3.60°C during the period of development, and at most 2.51°C during the period of grassland. This study proved that the urban heat island phenomenon increased when the urbanized areas increased, and the urban heat island phenomenon decreased when the artificial grassland areas increased in Cheongna International City where the reclamation project was carried out. The statistical results derived through this research can be used as the reference data for identifying the urban heat island problem in urban planning and establishing the reduction plan.

KEYWORDS : *Urban Heat Island, Land Cover Classification Map, Landsat Time-Series Imagery, Land Surface Temperature*

서론

도시 열섬 현상(Urban Heat Island, UHI)의 주원인은 지속적인 산업화 및 도시화이다. 더불어 냉각 효과의 감소를 유발하는 녹지면적 축소, 대기 순환을 방해하여 고온 공기를 고립시키는 고층 인공구조물의 밀집, 더 많은 태양열을 흡수하는 아스팔트 및 콘크리트의 지표면적 증가는 도시 열섬 현상을 심화시키는 요인들이다(Yoon *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2012;

Cho *et al.*, 2014; Je *et al.*, 2018). 이와 같이, 도시 열섬 현상은 도시 내 존재하는 다양한 요인들로 인해 도심지 중심의 평균 기온이 주변 교외 지역보다 높아지며 발생한다.

도시 열섬 현상으로 인해 발생하는 문제점은 지역 내 기온 상승, 통풍 불량 및 오존 증가 등과 같이 환경 악화를 유발하는 것이 있다. 이는 도시 내 거주하는 시민들의 인체 건강을 위협할 수 있는 가능성이 다분하며 도시의 올바른 신진대사 과정에 악영향을 미쳐 결과적으로 도시의 점진적인 지속성이 확보되지 못하게 된

다(Kim *et al.*, 2001; Oh *et al.*, 2005). 즉, 도시 열섬 현상은 콘크리트 구조물이나 아스팔트 도로와 같은 인공구조물이 많은 도시에서 발생한다(Jo *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011). 도시 열섬 현상으로 인해 도심지가 인접 교외 지역에 비해 평균 기온이 높아지면, 발생하는 고온의 공기가 섬 모양으로 뒤덮여 도시에서 발생된 열이 방출되지 못하는 문제점이 존재한다(Kim *et al.*, 2006; Kong *et al.*, 2016). 위 내용을 고려해본다면, 도시 열섬 현상 완화는 지형특성에 따른 지표 온도 분석이 필수적이다. 또한, 다양한 도시화 진행 지역에서 지속되는 도시 열섬 현상에 대한 완화방안을 마련하는 것이 시급하다.

위와 같이 도시 열섬 현상 완화 방안에 대한 선행 연구를 살펴보면 다음과 같다. Suh(2007)와 Yun *et al.*(2013)은 도시 열섬 현상에 대한 원인, 문제점 등을 파악하며 도시 열섬 현상의 해결 방안 중 일환으로 녹화사업이 도시 열섬 현상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였고, 이를 통해 녹화사업을 통한 도시 열섬 현상 감소 효과를 분석하였다. Lee *et al.*(2008)은 대구광역시의 도시 열 환경 특성을 파악한 후 일정한 간격의 교차선 및 교차점을 활용하여 열 환경 특성을 수치 정보화하였고, 이를 통해 열 환경 유형을 분류하였고 도시 열 환경 특성에 따른 완화 방안을 제시하였다. 또한, Ahn *et al.*(2012)는 부산광역시의 25년간 장기적 토지 피복 변화를 조사하였고 Landsat-7 ETM+ 영상을 통해 산출된 지표면 온도(Land Surface Temperature, LST)와 기온 자료를 활용하여 열섬 포텐셜(Heat Island Potential, HIP)을 분석하였으며, 이를 통해 토지이용에 따른 다른 기온 상승효과가 나타났음을 평가하였다. 그리고 Kim *et al.*(2022)은 시계열 Landsat 위성영상을 활용하여 나무심기운동을 통한 도시열섬 완화 방안을 분석하였다. Landsat 영상을 활용하여 제작한 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 정규시가지화지수(Normalized Difference Build-up Index,

NDBI), 도시화지수(Urbanized Index, UI)를 활용한 도시 열섬 현상 분석 연구도 활발히 진행되었다(Jo *et al.*, 2001; Karniel *et al.*, 2010; Quan *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015).

선행연구에서는 Landsat 위성영상 등을 활용하여 도시화가 이루어진 지역에 대해 도시 열섬 현상을 분석하였다. 그러나, 간척사업을 통해 생성되어 단기간에 걸친 급격한 도시개발이 진행된 지역에서 시가화 지역 면적 증가가 도시 열섬 현상에 미치는 영향과 지속적인 시가화 지역 면적 증가할 때 인공초지 면적 증가가 도시 열섬 현상에 미치는 영향에 관한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 단기간에 걸친 급격한 도시개발이 도시 열섬 현상에 미치는 영향을 파악하고자 시가화 지역의 면적 증가가 도시 열섬 현상에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 인공초지 조성과 같은 인위적으로 제작된 녹지면적 증가가 시가화 지역과 초지/산림지역 지표면 온도 차에 미치는 영향을 파악함으로써 인공초지 면적 변화가 도시 열섬 현상에 미치는 효과를 분석하였다.

연구자료 및 방법

1. 연구지역

본 연구에서는 인천광역시 서구에 위치하는 청라 국제도시 지역을 선정하였다(그림 1). 해당 지역은 간척사업을 통해 개발되었으며 2000년대까지 주로 농경지로 활용되었다. 그러나 2014년 인천 아시안 게임 주경기장 설립 및 개최를 목적으로 시가화 지역(주거, 상업, 공업 지역 등) 면적이 증가하였다. 결과적으로, 해당 기간 동안 단기간에 걸친 도시개발로 인해 도시 열섬 현상이 급격하게 심화되었다. 그러나 2014년부터 청라 국제도시는 청라중앙호수공원 설립과 같은 녹지사업을 통해 인공초지면적을 증가시켰다. 이는 해당 지역에서 도시 열섬 현상을 완화하는데 기여하였다. 따라서 본

논문에서는 청라 국제도시를 간척사업 이후 농경지 면적비율이 높았던 기간을 농경지 기간(2001-2008년)으로 시가화 지역 면적 증가 및 농경지 면적 감소가 이루어졌던 기간을 개발정비 기간(2009-2013년)으로 분류하였다. 또한, 인공초지 면적비율이 증가되었던 기간을 인공초지 조성 기간(2014-2020년)별로 분류하여 각 기간별 시가화 지역과 초지/산림지역의 LST 차이를 비교하였다. 이를 통해, 단기간에 걸친 급격한 도시화가 도시 열섬 현상에 미치는 영향과 인공초지 조성이 도시 열섬 현상에 미치는 영향을 파악하였다.



FIGURE 1. Satellite image of study area (Cheonga International City) in Incheon, Republic of Korea

2. 토지 피복도

토지 피복도는 주제도(Thematic Map)의 일환으로 동질의 특성이 내포된 구역을 색상 인덱싱(Color Indexing)화하여 지도형태로 표현한 공간정보 데이터베이스이다. 현재 환경부는 토지 피복도를 해상도에 따라 대분류(공간 해상도 30m), 중분류(공간 해상도 5m), 세분류(공간 해상도 1m)로 분류하고 있다(Oh *et al.*, 2016; So *et al.*, 2020). 대분류 토지 피복도는 감독 또는 무감독 기반 혼성 분류기법을 활용하여 한반도 전체의 토지피복을 7개 항목으로 분류하였다(표 1). 대분류 토지 피복도에는 1980년대, 1990년대, 2000년대 한반도 토지 피복에 대한 자료가 포함되어 있다. 중분류 토지 피복도는 위성영상을 활용하여 대한민국 지형을 22개 항목으로 분류하였다. 중분류 토지 피복도에는 2000년-20004년, 2007년, 2009년, 2013년에 대한 자료가 포함되어 있다. 세분류 토지 피복도는 위성영상을 활용하여 대한민국 지형을 41개 항목으로 분류하였다. 세분류 토지 피복도는 2010년-2020년 총 11차에 걸쳐 제작 및 단계적 배포되고 있다(Lee *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2007).

3. Landsat 위성영상

Landsat 프로그램은 지구 관측을 목적으로 개발된 인공위성 프로그램들 중 하나로서 Landsat 위성은 미합중국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)과 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey, USGS)이 공동으로 개발한 위성이다. Landsat은 세계 최초 민간 활용 위성으로 Glovis, Earth Explorer, Earth Data 등 NASA 및 USGS가 운영하는 위성영상 포털을 통해 위성영상을 취득할 수 있다. 또한 광범위한 지역에서 과거부터 현재까지 발생한 지표면의 변화 탐지 결과를 다양한 분야에서 활발하게 이용되고 있다(Park., 2010; Jee *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2018).

본 연구에서는 LST 산정을 목적으로 NASA 및 USGS가 운영하는 EarthExplorer 포털에서

TABLE 1. Land cover map classification

Main category	Middle category	Subcategory
Urbanized area	Residential area	Single-family housing
		Communal housing
	Industrial area	Industrial facility
	Commercial area	Commercial business facility
		Mixed area
	Cultural · Sports · Recreation area	Cultural · Sports · Recreation facility
		Airport
	Transportation area	Harbor
		Railroad
		Road
		Other transportation and communication facilities
	Public facility area	Environmental infrastructure
		Traffic administration facility
Other public facilities		
Agricultural area	Rice paddy	Paddy field arranged
		Paddy field non-arranged
	Field	Field arranged
		Field non-arranged
	Facility cultivation area	Facility plantation
	Orchard	Orchard
	Other cultivated area	Ranch farm
Other plantations		
Forest area	Hardwood forest	Hardwood forest
	Coniferous forest	Coniferous forest
	Mixed forest	Mixed forest
Grassland	Natural grassland	Natural grassland
		Golf course
	Artificial grassland	Cemetery
		Other grassland
Wetland	Inland wetland	Inland wetland
	Coastal wetland	Foreshore
		Saltern
Bare soil	Natural bare soil	Beach
		Riparian
		Rock
	Artificial bare soil	Mining area
		Playground
	Other bare soil	
Water body	Inland water body	River
		Appeal
	Sea water body	Sea water body

제공하는 Landsat TM/ETM+ 위성영상을 사용하였다. Landsat 위성영상 자료는 대상지역으로 선정된 청라 국제도시를 대상으로 2001년부터 2020년까지 Land Cloud Cover가 20% 이하의 조건을 충족하는 20년치 자료를 수집하

여 사용하였으며, 해당 과정에서 Landsat 4-5 TM 및 Landsat 8 OLI/TIRS에 존재하지 않는 자료는 Landsat 7 ETM+ 위성영상으로 대체하였다(표 2).

TABLE 2. Landsat time-series imagery used in this research

Date(YYYY/MM/DD)	Season	Landsat Type
2001/06/03	Summer	Landsat 7 ETM+
2001/12/20	Winter	Landsat 4-5 TM
2002/06/30	Summer	Landsat 4-5 TM
2002/12/31	Winter	Landsat 7 ETM+
2003/06/17	Summer	Landsat 4-5 TM
2003/12/26	Winter	Landsat 4-5 TM
2004/06/03	Summer	Landsat 4-5 TM
2004/12/12	Winter	Landsat 4-5 TM
2005/05/29	Summer	Landsat 7 ETM+
2005/01/13	Winter	Landsat 4-5 TM
2006/08/04	Summer	Landsat 7 ETM+
2006/12/18	Winter	Landsat 4-5 TM
2007/07/30	Summer	Landsat 4-5 TM
2007/12/29	Winter	Landsat 7 ETM+
2008/08/25	Summer	Landsat 7 ETM+
2008/12/31	Winter	Landsat 7 ETM+
2009/06/01	Summer	Landsat 4-5 TM
2009/11/24	Winter	Landsat 4-5 TM
2010/06/04	Summer	Landsat 4-5 TM
2010/11/11	Winter	Landsat 4-5 TM
2011/06/15	Summer	Landsat 7 ETM+
2011/12/24	Winter	Landsat 7 ETM+
2012/06/17	Summer	Landsat 7 ETM+
2012/11/24	Winter	Landsat 7 ETM+
2013/06/04	Summer	Landsat 7 ETM+
2013/12/21	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS
2014/05/30	Summer	Landsat 8 OLI/TIRS
2014/12/08	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS
2015/07/04	Summer	Landsat 8 OLI/TIRS
2015/11/16	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS
2016/08/07	Summer	Landsat 8 OLI/TIRS
2016/11/11	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS
2017/06/30	Summer	Landsat 8 OLI/TIRS
2017/11/30	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS
2018/05/25	Summer	Landsat 8 OLI/TIRS
2018/11/01	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS
2019/06/13	Summer	Landsat 8 OLI/TIRS
2019/12/06	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS
2020/07/17	Summer	Landsat 8 OLI/TIRS
2020/12/24	Winter	Landsat 8 OLI/TIRS

4. 연구방법

청라 국제도시 토지 피복도 제작을 목적으로 환경 공간 정보서비스(Environmental Geographic Information Service, EGIS)에서 제공하는 토지 피복도를 활용하였으며, 2001년, 2007년, 2009년, 2018년에 제작된 축척 1:25000 중분

류 토지 피복도와 2020년에 제작된 축척 1:5000 세분류 토지 피복도를 활용하였다. 토지 피복도 분류항목을 기준으로 QGIS 3.16을 사용하여 토지 피복도를 시가화 지역과 초지/산림지역, 농경지로 구분하였다(그림 2). 이를 통해 청라 국제도시의 기간별(농경지 기간, 개발

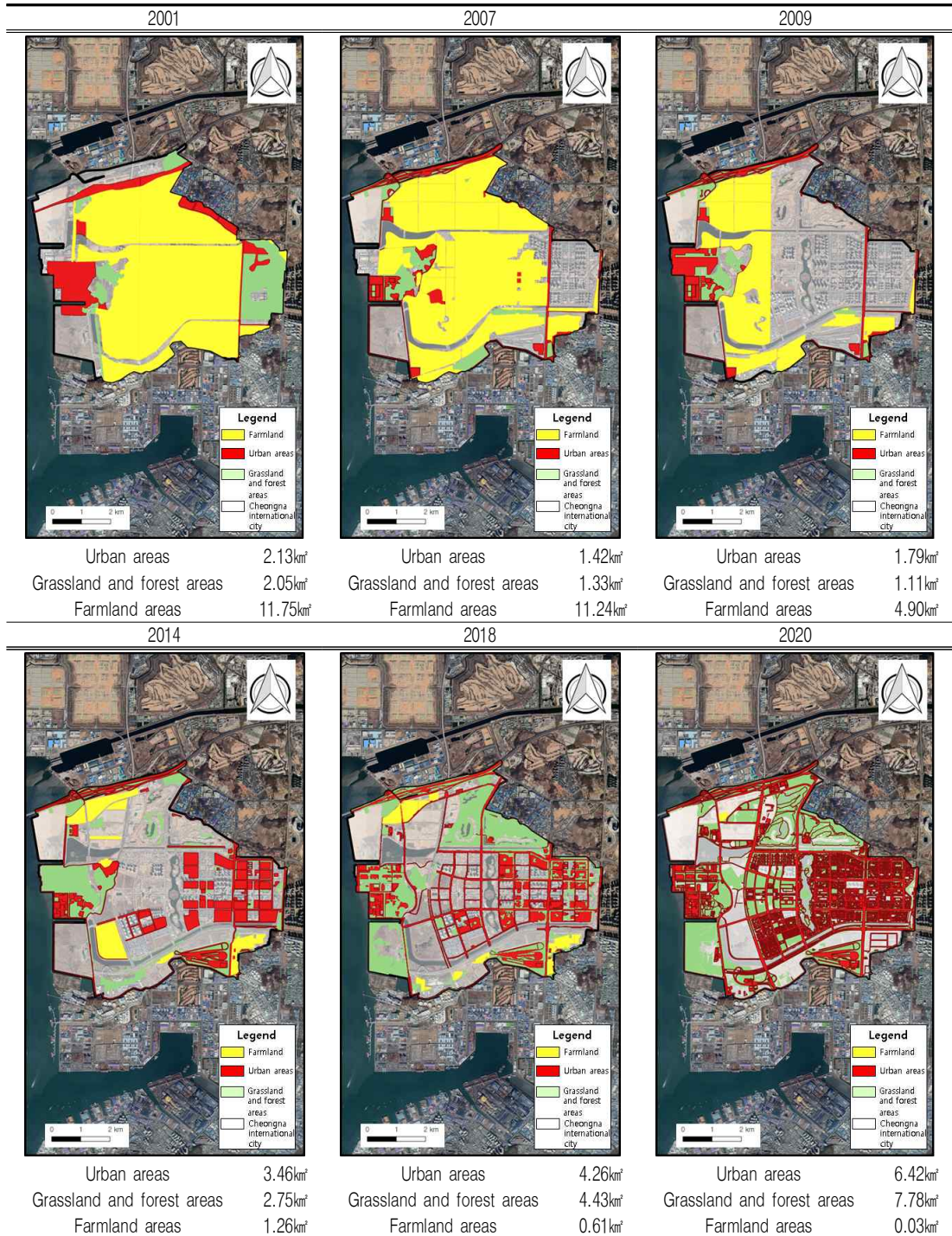


FIGURE 2. Expansion of the urban and grassland/forest areas in Cheongna international city

정비 기간, 인공초지 조성 기간) 시가화 지역과 초지/산림지역의 분포면적을 비교하였다.

또한, 인공초지 조성 기간에 형성된 인공초지 면적을 비교하여 해당 기간 내 청라 국제도시에서 인공초지 면적 증가를 확인하였다(그림 3).

지표면 온도(Land Surface Temperature, LST)는 Landsat의 열적외선 밴드를 이용하여 측정할 수 있는 토지의 복사 피부 온도로서 지구 기후 시스템 내에서 중요한 변수이다(Kim

et al., 2022). 본 연구에서는 절대 방사량을 환원하는 NASA Model을 기반으로 Landsat TM/ETM+ 위성영상을 활용하여 LST를 계산하였다(Park *et al.*, 1999; Jung *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2018).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{Q_{cal\max} - Q_{cal\min}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal\min}) + L_{\min}$$

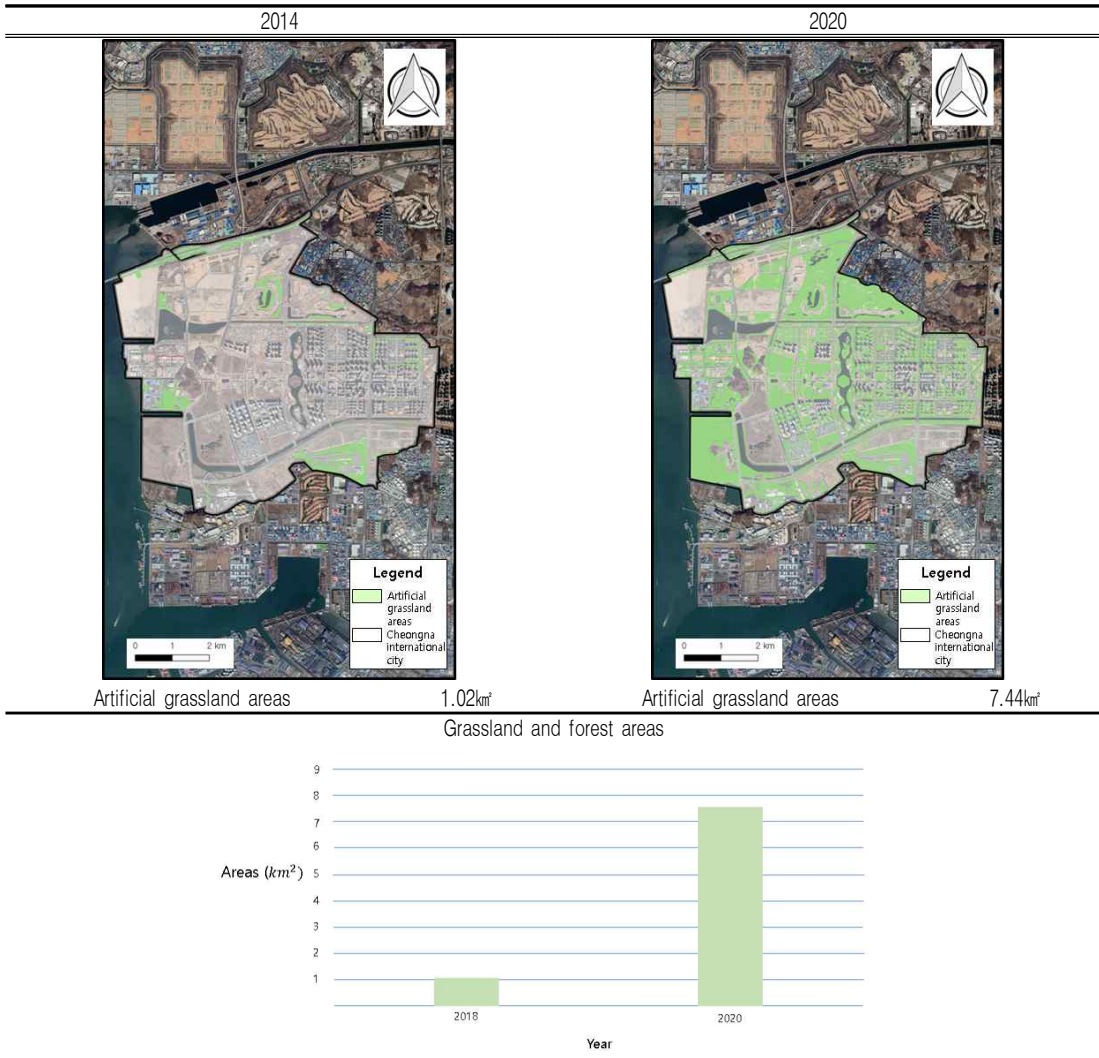


FIGURE 3. Expansion of the artificial grasslands in Cheongna international city

TABLE 3. Landsat TM/ETM+ Thermal band correction constants

Division	K1	K2
Landsat TM	60.776	1260.56
Landsat ETM+	666.09	1282.71

여기서,

- L_{λ} (절대 방사휘도) : 측정된 분광 방사량 ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)
- L_{max} (최대 방사휘도) : $Q_{cal} = 0$ 일 때 분광복사에너지 ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)
- L_{min} (최소 방사휘도) : $Q_{cal} = Q_{calmax}$ 일 때 분광복사에너지 ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)
- Q_{calmax} : DN 단위로 정량화된 최대복사 에너지
- Q_{calmin} : DN 단위로 정량화된 최소복사 에너지
- Q_{cal} : Digital Number

Landsat TM/ETM+ 위성영상에서 구한 절대 방사휘도 L 은 아래 식과 같은 절대온도(K) 사이 다음과 같은 상관관계가 존재한다.

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

여기서,

- $T(K)$: Effective at satellite temperature in Kelvin
- $K1$: Calibration constant 1 in $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$
- $K2$: Calibration constant 2 in degree Kelvin
- $T(K)$: Spectral radiance in $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$

표 3은 Landsat TM/ETM+ 열적외 보정상수를 나타내고 있다(Jung *et al.*, 2011).

해당 과정을 통해 산정되는 온도는 절대온도(K)로 섭씨온도($^{\circ}C$)로 환산하기 위해 아래와

같은 과정을 거친다.

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$$

Landsat 위성영상의 다중분광 밴드를 활용한 LST 산정에는 NASA Model을 활용하는 방법과 Landsat TM/ETM+ 위성영상 및 QGIS의 RS/GIS 플러그인을 활용하는 방법이 존재한다. 본 연구에서는 QGIS 3.16에서 제공하는 RS/GIS 플러그인을 활용하여 개별 Landsat 위성영상을 기반으로 청라 국제도시의 LST를 제작하였다. 그림 4는 2001년 06월 03일에 촬영된 Landsat 위성영상을 활용하여 제작한 청라국제도시의 LST 결과로서 앞선 과정을 통해 2001년 06월 03일 청라국제도시의 표면온도가 최소 $+18^{\circ}C$ 에서 최대 $+40^{\circ}C$ 인 것을 확인하였다.



FIGURE 4. LST of Cheongna international city derived from Landsat satellite imagery acquired on June 3, 2001

결과 및 고찰

1. 청라 국제도시의 기간별 지표면온도(LST) 차이 분석

본 연구에서는 청라 국제도시의 기간별(농경지 기간, 개발정비 기간, 인공초지 조성 기간) 시가화 지역과 초지/산림지역의 LST 차이를 분석하기 위해 다음과 같은 과정을 수행하였다. 산정된 LST 자료를 QGIS 3.16의 '래스터 픽셀을 포인트로 변환' 기능을 활용하여 픽셀

(Pixel)에서 포인트(Point)로 변환하였다. 이후, 포인트(Point)로 변환된 LST를 QGIS 3.16의 '교차영역' 기능을 사용하여 기간별 토지 피복도와 중첩하였다. 중첩된 파일을 QGIS 3.16의 '백터 레이어 분할' 기능을 활용하여 토지 피복도 중분류 기준으로 분할하였다. 해당 과정을 통해 청라 국제도시의 기간별 시가화 지역 LST에서 초지/산림지역 LST를 차감하여 시가화 지역과 초지/산림지역 간의 LST 차이를 파악하였다(표 4). 또한, 아래 그림 5와 같

TABLE 4. Difference in land surface temperature between urbanized areas and forest areas

Year	Period	Season	Land Cover Type	Average LST	LST Differences
2001		Summer	Urban area	+26.91°C	-2.86°C
			Grassland and forest area	+29.77°C	
		Winter	Urban area	-0.92°C	+0.10°C
			Grassland and forest area	-1.02°C	
2002		Summer	Urban area	+27.19°C	-0.52°C
			Grassland and forest area	+27.71°C	
		Winter	Urban area	-0.65°C	+0.07°C
			Grassland and forest area	-0.72°C	
2003		Summer	Urban area	+22.50°C	+0.23°C
			Grassland and forest area	+22.27°C	
		Winter	Urban area	-1.19°C	+0.29°C
			Grassland and forest area	-1.48°C	
2004	Farmland	Summer	Urban area	+27.19°C	-0.69°C
			Grassland and forest area	+27.89°C	
		Winter	Urban area	+5.80°C	-0.18°C
			Grassland and forest area	+5.98°C	
2005		Summer	Urban area	+25.57°C	-0.62°C
			Grassland and forest area	+26.19°C	
		Winter	Urban area	-1.20°C	-0.14°C
			Grassland and forest area	-1.06°C	
2006		Summer	Urban area	+25.83°C	-0.23°C
			Grassland and forest area	+26.06°C	
		Winter	Urban area	-4.1°C	+1.06°C
			Grassland and forest area	-5.16°C	
2007		Summer	Urban area	+19.96°C	-0.31°C
			Grassland and forest area	+20.27°C	
		Winter	Urban area	-2.09°C	+0.46°C
			Grassland and forest area	-2.55°C	
2008		Summer	Urban area	+20.64°C	0°C
			Grassland and forest area	+20.64°C	
		Winter	Urban area	-1.87°C	+0.82°C
			Grassland and forest area	-2.69°C	

TABLE 4. Continued

Year	Period	Season	Land Cover Type	Average LST	LST Differences
2009		Summer	Urban area	+27.55°C	+2.51°C
			Grassland and forest area	+25.04°C	
		Winter	Urban area	+9.65°C	+0.34°C
			Grassland and forest area	+9.31°C	
2010		Summer	Urban area	+28.41°C	+2.45°C
			Grassland and forest area	+25.96°C	
		Winter	Urban area	+10.42°C	+0.45°C
			Grassland and forest area	+9.97°C	
2011		Summer	Urban area	+27.37°C	+2.78°C
			Grassland and forest area	+24.59°C	
		Winter	Urban area	-5.43°C	-0.25°C
			Grassland and forest area	-5.18°C	
2012	Development	Summer	Urban area	+31.3°C	+3.60°C
			Grassland and forest area	+27.7°C	
		Winter	Urban area	+6.39°C	+0.53°C
			Grassland and forest area	+5.86°C	
2013		Summer	Urban area	+22.28°C	+1.56°C
			Grassland and forest area	+20.72°C	
		Winter	Urban area	-0.43°C	+0.73°C
			Grassland and forest area	-1.16°C	
2014		Summer	Urban area	+30.51°C	+2.23°C
			Grassland and forest area	+28.28°C	
		Winter	Urban area	-1.14°C	-0.40°C
			Grassland and forest area	-0.74°C	

이 기간별 시가화 지역과 초지/산림지역 간의 LST 차이를 연도별/계절별로 구분하여 도식하였다.

표 4와 그림 5에 표시된 시가화 지역 및 초지/산림지역의 LST는 다음과 같은 과정으로 산정하였다. 토지 피복도 중분류 항목을 기준으로 시가화 지역을 주거지역, 공업지역, 상업지역, 문화체육휴양지역, 교통지역, 공공시설지역으로 구분하였다. 초지/산림지역은 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 자연초지, 인공초지로 구분하였다. 이후 구분된 지역의 LST 평균값을 산정하였으며, 산정된 LST 평균값을 시가화 지역과 초지/산림지역을 기준으로 다시 취합하여 LST 평균값에 대한 평균을 산정하였다. 이러한 과정을 통해 산정된 LST 값을 시가화 지역 및 초지/산림지역의 LST 값으로 취하였다.

앞선 방식으로 산정된 여름철 농경지 기간(2001년~2008년)의 시가화 지역과 초지/산림

지역 간의 LST 차이는 -2.86°C(2001년), -0.51°C(2002년), +0.23°C(2003년), -0.69°C(2004년), -0.62°C(2005년), -0.23°C(2006년), -0.31°C(2007년), 0°C(2008년)로 최대 +0.23°C 온도차가 나타났음을 확인하였다. 겨울철 농경지 기간의 LST 차이는 +0.11°C(2001년), +0.08°C(2002년), +0.29°C(2003년), -0.18°C(2004년), -0.14°C(2005년), +1.05°C(2006년), +0.46°C(2007년), +0.82°C(2008년)로 최대 +1.05°C 온도차가 나타났음을 확인하였다. 이에 따라 청라국제도시의 농경지 기간에는 겨울철 LST 차이가 여름철 LST 차이보다 높게 발생하며 농경지 기간에는 도시열섬현상이 심화되지 않았음을 확인하였다.

여름철 개발정비 기간(2009년~2013년)의 LST 차이는 +2.51°C(2009년), +2.45°C(2010년), +2.78°C(2011년), +3.60°C(2012



FIGURE 5. Graphs showing time-series LST between urbanized areas and grassland/forest areas

년), $+1.56^{\circ}\text{C}$ (2013년)로 최대 $+3.60^{\circ}\text{C}$ 온도차가 나타났음을 확인하였다. 겨울철 개발정비기간의 LST 차이는 $+0.34^{\circ}\text{C}$ (2009년), $+0.45^{\circ}\text{C}$ (2010년), -0.25°C (2011년), $+0.53^{\circ}\text{C}$ (2012년), $+0.73^{\circ}\text{C}$ (2013년)로 최대 $+0.73^{\circ}\text{C}$ 온도차가 나타났음을 확인하였다.

여름철 인공초지조성 기간(2014년~2020년)의 LST 차이는 $+2.23^{\circ}\text{C}$ (2014년), $+2.02^{\circ}\text{C}$ (2015년), $+1.60^{\circ}\text{C}$ (2016년), $+1.58^{\circ}\text{C}$ (2017년), $+2.51^{\circ}\text{C}$ (2018년), $+2.45^{\circ}\text{C}$ (2019년), $+2.27^{\circ}\text{C}$ (2020년)로 최대 $+2.51^{\circ}\text{C}$ 온도차가 나타났음을 확인하였다. 겨울철 인공초지조성 기간의 LST 차이는 -0.40°C (2014년), $+0.15^{\circ}\text{C}$ (2015년), $+0.13^{\circ}\text{C}$ (2016년), $+0.36^{\circ}\text{C}$ (2017년), $+0.87^{\circ}\text{C}$ (2018년), $+0.42^{\circ}\text{C}$ (2019년), -0.29°C (2020년)로 최대 $+0.87^{\circ}\text{C}$ 온도차가 나타났음을 확인하였다.

따라서 청라 국제도시는 겨울철보다 여름철에 LST 차이가 현저하게 나타나는 것을 파악하였으며 시가화 지역 면적비율의 증가가 시가화 지역과 초지/산림 지역의 LST 차이를 더욱 심화시킨다는 것을 확인하였다. 또한, 시가화 지역의 면적비율이 증가하여 지속적으로 도시화가 진행되더라도 인공초지 면적 비율이 증가한다면 LST 차이가 다소 저감될 수 있음을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 청라 국제도시를 대상으로 토지 피복도와 LST를 활용하여 급격한 도시개발과 인공초지 조성이 도시 열섬 현상에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 농경지 기간 동안에는 시가화 지역의 지표온도가 주변 초지/산림지역의 지표온도에 비해 낮아서 도시 열섬 현상이

나타나지 않았으나, 개발정비 기간에는 시가화 지역과 초지/산림지역의 LST 차이가 최대 +3.60°C 발생하였다. 인공초지 조성 기간에는 두 지역의 LST 차이가 개발정비 기간에 비해 최대 +2.51°C로 감소한 것을 파악하였다. 따라서 본 연구 결과를 기반으로 지속적인 시가화 지역 면적 증가는 시가화 지역과 초지/산림지역 LST 차이를 증가시키며, 지속적으로 시가화 지역 면적이 증가되더라도 인공초지 면적이 증가된다면 도시열섬현상에 영향을 미치는 LST 차이가 저감된다는 것을 파악하였다.

본 연구를 통해 산출한 결과를 기반으로 청라 스타필드 돔구장 건설과 같은 대규모 복합 시설 건설계획을 진행하게 되며 발생하는 녹지 면적감소가 도시 열섬 현상에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 수 있으며, 향후 청라 국제도시에서 도시 열섬 현상을 고려한 개발계획을 수립할 때 연구 자료로서 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 위성영상 촬영 시 기상 조건 및 영상의 촬영 주기 등으로 인해 매년 동일 시점에 촬영된 Landsat 위성영상을 활용하지 못한 한계가 존재하였다. 이러한 이유로 특정 시기에 촬영된 Landsat 4-5 TM 및 Landsat 8 OLI/TIRS 위성영상의 부재로 인해 Scan Line Corrector(SLC)-off Error가 존재하는 Landsat 7 ETM+를 활용하였고, 이로 인해 기간별 LST 차이의 비교에 한계가 있었으며, 위성영상 활용에 있어 공간해상도의 문제가 존재하였다. 또한, 토지 피복도는 촬영시기와 제작이 완료된 토지 피복도의 산출물 시기가 다르므로 향후에는 도로명주소 전자지도와 같은 촬영과 제작 주기가 비교적 짧은 자료를 활용하여 보다 구체적인 결과를 도출할 필요성이 존재한다고 판단된다. 마지막으로 본 연구 결과에서 활용한 위성영상 외에 기상인자 정보를 접목시킨다면 도시 열섬 현상에 대한 원인을 명확하게 제시하는 동시에 구체적인 해결방안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. **KAGIS**

REFERENCES

- Ahn, J.S., J.D. Hwang, M.H. Park and Y.S. Suh. 2012. Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using Landsat-7 ETM+ and AWS data. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(4): 65-77 (안지숙, 황재동, 박명희, 서영상. 2012. Landsat-7 ETM+ 영상과 AWS 자료를 이용한 부산의 토지피복에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 산출. *한국지리정보학회지* 15(4): 65-77).
- Cho, H.S., Y.J. Jung and M.J. Choi. 2014. Effects of the urban spatial characteristics on urban heat island. *Journal of Environmental Policy and Administration* 22(2):27-43 (조희선, 정유진, 최막중. 2014. 도시공간특성이 열섬현상에 미치는 영향. *환경정책* 22(2):27-43).
- Je, M.H. and S.H. Jung. 2018. Urban heat island intensity analysis by landuse types. *The Journal of the Korea Contents Association* 18(11):1-12 (제민희, 정승현. 2018. 토지이용 유형별 도시열섬강도 분석. *한국콘텐츠학회논문지* 18(11):1-12).
- Jee, J.B., B.Y. Kim, I.S. Zo, K.T. Lee and Y.J. Choi. 2016. Retrieval of land surface temperature based on high resolution landsat 8 satellite data. *Korean journal of remote sensing* 32(2):171-183 (지준범, 김부요, 조일성, 이규태, 최영진. 2016. 고해상도 Landsat 8 위성자료기반의 지표면 온도 산출. *대한원격탐사학회지* 32(2):171-183).
- Jo, H.K. and T.W. Ahn. 1999. Function of microclimate amelioration by urban greenspace. *Journal of Korean institute of landscape architecture* 27(4):23-28 (조현길, 안태원. 1999. 도시녹지에 의한 미기후개선의 기능.

- 한국조경학회지 27(4):23-28).
- Jo, M.H., K.J. Lee, W.S. Kim. 2001. A study on the spatial distribution characteristic of urban surface temperature using remotely sensed data and GIS. *Journal of the Association of Geographic Information Studies* 4(1):57-66 (조명희, 이광재, 김운수. 2001. 원격탐사자료와 GIS를 활용한 도시 표면온도의 공간적 분포특성에 관한 연구. *한국지리정보학회지* 4(1):57-66).
- Jung, G.S., S. Koo, and H.H. Yoo. 2011. Temperature change analysis for land use zoning using Landsat satellite imagery. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* 19(2):55-61 (정길섭, 구슬, 유환희. 2011. Landsat 위성영상에 의한 용도지역 온도변화분석. *대한공간정보학회지* 19(2):55-61).
- Karnieli, A., N. Agam, R.T. Pinker, M. Anderson, M.L. Imhoff, G.G. Gutman, N. Panov and A. Goldberg. 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations. *Journal of Climate* 23(3):618-633.
- Kim, G.H., Y.G. Lee, J.H. Kim, H.W. Choi and B.J. Kim. 2018. Analysis of the cooling effects in urban green areas using the Landsat 8 satellite data. *Korean Journal of Remote Sensing* 34(2):167-178 (김근희, 이영근, 김재환, 최희욱, 김백조. 2018. Landsat 8 위성자료를 이용한 도심녹지 냉각 효과 분석. *대한원격탐사학회지* 34(2):167-178).
- Kim, H.O. and J.M. Yeom. 2012. Effect of the urban land cover types on the surface temperature: case study of Ilsan New City. *Korean Journal of Remote Sensing* 28(2):203-214 (김현옥, 염종민. 2012. 도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향: 경기도 일산 신도시를 중심으로. *대한원격탐사학회지* 28(2):203-214).
- Kim, J.S., D.K. Lee, S.Y. Sung, S.G. Jeong and J.H. Park. 2015. Study of vulnerable district characteristics on urban heat island according to land use using normalized index - Focused on Daegu Metropolitan City residential district -. *Journal of Korea Planning Association* 50(5):59-72 (김준식, 이동근, 성선용, 정승규, 박종훈. 2015. 정규화 지수를 이용한 토지이용에 따른 도시 열섬 취약지특성분석 - 대구시 주거지역을 대상으로 -. *국토계획* 50(5):59-72).
- Kim, K., H.S. Kim, Y.H. Kwon, I.S. Park and Y.-J. Choung. 2022. Analysis of changes in the land surface temperature according to tree planting campaign to reduce urban heat island. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 25(1):16-27 (김경훈, 김형수, 권용하, 박인선, 정운재. 2022. 도시열섬 완화를 위한 나무심기운동에 따른 지표면 온도 변화 분석-구미시를 사례로-. *한국지리정보학회지* 25(1):16-27).
- Kim, M.K., S.P. Kim, N.H. Kim and H.G. Sohn. 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 (김미경, 김상필, 김남훈, 손홍규. 2014. LANDSAT 영상을 이용한 세종특별자치시의 도시화와 열섬현상 분석. *대한토목학회지* 34(3):1033-1041).
- Kim, S.B., G.H. Kim and J.H. Cho. 2001. The urban heat island phenomenon and potential mitigation strategies. *Journal of Nakdong River Environmental Research Institute* 6:63-89 (김수봉, 김기호, 조진희. 2001. 도시열섬현상의 원인과 대책. *환경과*

- 학논집 6:63-89).
- Kim, S.B., E.H. Jung and G.H. Kim. 2006. Analysis of street trees and heat island mosaic in Jung-gu, Daegu. *Journal of Environmental Science International* 15(4): 325-332 (김수봉, 정응호, 김기호. 2006. 대구광역시 중구의 가로수 및 열섬 모자이크 현황 분석. *한국환경과학회지* 15(4):325-332).
- Kim, T.H., W.H. Lee and Y.K. Han. 2018. Analysis of thermal heat island potential by urbanization using Landsat-8 time-series satellite imagery. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* 36(4): 305-316 (김태현, 이원희, 한유경. 2018. Landsat-8 시계열 위성영상을 활용한 도심지 확장에 따른 열섬포텐셜 분석. *한국측량학회지* 36(4):305-316).
- Kim, Y.J., D.H. Kang and K.H. Ahn. 2011. Characteristics of urban heat-island phenomena caused by climate changes in Seoul, and alternative urban design approaches for their improvements. *Journal of The Urban Design Institute of Korea* 12(3):5-14 (김용진, 강동화, 안건혁. 2011. 기후변화에 따른 도시열섬현상 특성 변화와 도시설계적 대안 모색에 관한 기초연구. *한국도시설계학회지* 12(3):5-14).
- Kong, H.Y., S.H. Kim and H.G. Cho. 2016. Effect of land use on urban thermal environments in Incheon, Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3(4):315-321 (공학양, 김석현, 조형진. 2016. 인천시에서 토지이용이 도시 열 환경에 미치는 영향. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3(4):315-321).
- Lee, K.G. and W.H. Hong. 2008. A study on the urban heat environment pattern analysis and alleviation plan. *Journal of the Architectural Institute of Korea* 24(9):253-260 (이강국, 홍원화. 2008. 도시 열환경 유형 분석 및 완화방안에 관한 연구. *대한건축학회지* 24(9):253-260).
- Lee, S.I., C.S. Lee, J.G. Cho and Y.S. Choi. 2003. Mapping of land cover map using satellite imagery data -Focusing on the ministry of environment land cover map (Level II)-. *Proceedings of the Korean Association of Geographic Information Studies Conference 2003*:629-636 (이상익, 이종수, 조정건, 최윤수. 2003. 인공위성 영상자료를 이용한 중분류 토지피복도 제작. *한국GIS학회:학술대회논문집* 2003:629-636).
- 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 Korean Association of Geographic Information Studies* 13(1): 142-154 (이우성, 정성관, 박경훈, 김경태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. *한국지리정보학회지* 13(1):142-154).
- Oh, K.S. and J.J. Hong. 2005. The relationship between urban spatial elements and the urban heat island effect. *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design* 6(1):47-63 (오규식, 홍재주. 2005. 도시 열환경 유형 분석 및 완화방안에 관한 연구. *대한건축학회지* 6(1):47-63).
- Oh, K.Y., M.J. Lee and W.Y. No. 2016. A study on the improvement of sub-divided land Cover map classification system - Based on the land cover map by ministry of environment -. *Korean Journal of Remote Sensing* 32(2):105-118 (오관영, 이명진, 노우영. 2016. 세분류 토지피복도 분류체계 개선방안 연구 - 환경부 토지피복도를 중심

- 으로. 대한원격탐사학회 32(2):105-118).
- Park, J.H., J.S. Kim and S.I. Na. 2006. Analysis of the relationship between land cover and land surface temperature at Cheongju region using landsat images in summer day. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(5):39-48 (박중화, 김진수, 나상일. 2006. LANDSAT 영상을 이용한 여름철 청주지역의 토지피복과 지표면온도와의 관계 분석. *한국농공학회지* 48(5):39-48).
- Park, J.J., C.Y. Ku and B.S. Kim. 2007. Improvement of the level-2 land cover map with satellite image. *The Journal of GIS Association of Korea* 15(1):67-80 (박정재, 구자용, 김병선. 2007. 위성영상을 이용한 중분류 토지피복도의 제작과정 개선. *한국 GIS 학회지* 15(1):67-80).
- Park, J.K. 2010. Change detection of vegetation using Landsat image - Focused on Daejeon City -. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* 28(2):239-246 (박준규. 2010. Landsat 영상을 이용한 식생의 변화 탐지-대전광역시를 중심으로. *한국측량학회지* 28(2):239-246).
- Park, K.H. and S.G. Jung. 1999. Analysis on urban heat island effects for the metropolitan green space planning. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 2(3):35-45 (박경훈, 정성관. 1999. 광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과 분석. *한국지리정보학회지* 2(3):35-45).
- Quan, H.C. and B.G. Lee. 2009. Analysis of relationship between LST and NDVI using Landsat TM images on the city areas of Jeju island. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science* 17(4):39-44 (권혁춘, 이병걸. 2009. Landsat TM 영상을 이용한 제주도 도심지역 지표면 온도 분포와 식생지수의 상관성 분석. *한국지형공간정보학회지* 17(4):39-44).
- So, Y.Y., S.J. Lee, S.W. Choi and S.J. Lee. 2020. Construction of NCAM-LAMP precipitation and soil moisture database to support landslide prediction. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 22(3):152-163 (소윤영, 이수정, 최성원, 이승재. 2020. 산사태 예측을 위한 NCAM-LAMP 강수 및 토양수분 DB 구축. *한국농림기상학회지* 22(3):152-163).
- Suh, E.C. 2007. A study on the mitigation policies for urban heat island. *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 7(2):17-23 (서응철. 2007. 도시열섬 완화를 위한 제도개선. *한국생태환경건축학회지* 7(2):17-23).
- Yoon, M.H. and T.M. Ahn. 2009. An application of satellite image analysis to visualize the effects of urban green areas on temperature. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 37(3):46-53 (윤민호, 안동만. 2009. 위성영상을 이용한 도시녹지의 기온저감 효과 분석. *한국조경학회지* 37(3):46-53).
- Yun, H.C., M.G. Kim and K.Y. Jung. 2013. Analysis of temperature change by forest growth for mitigation of the urban heat island. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 31(2):143-150 (윤희천, 김민규, 정갑용. 2013. 도시열섬 완화를 위한 녹지증가에 따른 온도변화 분석. *한국측량학회지* 31(2):143-150). [KAGIS](#)