

논 문

위성영상 기반 지표온도분포 클러스터링 기법을 활용한 도시 내 열섬우심지구 추출

Extraction of the Severe Heat Island Districts in Urban Areas by the Clustering Technique of Land Surface Temperature Distribution Using Satellite Imagery

김원재*, 임현만, 신형섭¹⁾

한국건설기술연구원 환경연구본부, ¹⁾(주)이알아이

WeonJae Kim*, HyunMan Lim, HyoungSub Shin¹⁾

Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, Republic of Korea

¹⁾ERI (Co.), Chungcheongbuk-do, Republic of Korea

접수일 2021년 6월 17일

수정일 2021년 7월 24일

채택일 2021년 7월 29일

Received 17 June 2021

Revised 24 July 2021

Accepted 29 July 2021

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-910-0303

E-mail : wjkim1@kict.re.kr

Abstract Because of climate change and urbanization, there have been concerns about the intensification of the heat island phenomenon. In Korea, existing studies carried out to select heat island regions in urban areas have mainly utilized the technique to compare and review land use characteristics and land surface temperature (LST) distribution at administrative-dong level based on satellite imagery. In this study, based on satellite imagery and GIS (geographic information system) in conjunction, a novel technique to find out heat island districts in urban areas was presented. The LST distribution was calculated by acquiring and superimposing 21 satellite images during the summer season (May~September) over 2010~2020. The new clustering methodology of LST distribution map was proposed to specify the heat island districts in detail, and as its key guideline, the top 10% of LST_ULE (LST_upper limit of extraction) and 200 m resolution of temperature pixels were suggested. A total of 27 sites were derived as the result of extracting heat island districts by the application of this new methodology for Goyang-si; there were 13 districts where their average LST values exceeded 30°C, and 7 ones larger than 1 km². As a result of examining the four largest districts, the 1st and 2nd ones were found to be urban regions with high density of apartments, and the 3rd and 4th districts were factory regions around the new-town sectors. It is judged that the clustering methodology proposed in this study is very efficient to extract the severe heat island districts in urban areas and establish the appropriate heat island mitigation measures suitable for each land use characteristic.

Key words: Climate change, Heat island phenomenon, Severe heat island district, Land surface temperature distribution, Clustering

1. 서 론

도시 열섬현상이란 도시지역이 주변의 교외지역에 비하여 높은 온도를 나타내는 현상을 의미하며, 1820년 영국의 Luke Howard가 런던의 높은 이상기온을 설명하기 위해 처음으로 제시한 개념인 것으로 알려

져 있다(Hong *et al.*, 2013; Howard, 1833). 도시지역과 그 주변지역의 온도분포는 빌딩이 밀집된 도시 중앙부에서 높고 녹지가 많은 도시 외곽으로 갈수록 낮아지는 현상이 나타나는데 (<https://geography.name/urban-heat-island/>), 이와 같은 열섬현상에 대해 다음과 같은 원인들이 거론된다. ① 도시화에 기인하는 측

면으로는 시가지의 건물 및 지표면의 특성(콘크리트, 아스팔트)에 의해 지표면이 흡수한 빛을 적외선 형태의 열로 방출하게 되고, 주변의 도시화가 이미 진행된 상태이기 때문에 바람이 불어와도 온도 차이가 없는 점 등을 들 수 있다. ② 산업화의 진전에 기인하는 측면으로 공장, 자동차 배기가스, 건물 공조기, 조명, 에어컨 실외기 등에 의해 인공열 및 대기오염물질이 방출된다는 점 등을 들 수 있다. 이런 상황은 바람이 없고 맑은 날 더욱 심해지는 것으로 보고되고 있다. ③ 개발의 증가에 기인하는 측면으로 녹지 감소에 의해 자연적 완충능력이 줄어들어 따라 도시지역이 교외 지역에 비해 열과 빛에 대한 흡수도는 크고 반사(방출)도는 작은 현상이 나타난다는 점 등을 들 수 있다 (Myeong, 2010; Kim *et al.*, 2001). 열섬현상이 이와 같은 복합적인 원인들에 의해 유발되기 때문에 주야간에는 물론이고 계절적으로도 심화 정도가 상이한데, 일반적으로 하절기보다 동절기에 더욱 뚜렷하게 나타나고, 도시지역에서는 주택단지의 입지 및 조성특성에 따라 서로 차이가 발생한다고 보고되고 있다 (Chun *et al.*, 2014; Hwang and Kim, 2003).

도시의 열섬현상은 탈진이나 쇼크와 같은 건강상의 피해를 유발하며, 폭염과 열대야를 가중시키기도 한다. 폭염일수가 늘고 온도가 높아질수록 열사병 환자의 수와 사망률이 증가하고, 열대야 현상에 의해 수면 장애가 유발되기 때문에 시민의 건강과도 직결되며, 에너지 소비행태에도 영향을 준다고 알려져 있다 (Hwang and Kim, 2003). 또 다른 문제점으로 외부의 맑고 차가운 공기의 유입이 차단됨으로써 온실효과가 심화된다는 점, 때에 따라 차가운 공기가 유입될 경우 안개가 발생하여 교통사고가 증가한다는 점, 안개와 대기오염물질의 광화학작용으로 스모그 및 초미세먼지 농도가 증가하고 호흡기 질환자가 늘어난다는 점 등을 들 수 있다. 이와 같은 도시 열섬현상은 국내의 여러 주요도시들에서 대두되고 있으며, 특히 서울이 심각한 것으로 보고되고 있다 (Myeong, 2010).

도시 내 열섬우심지역을 도출하기 위해 수행된 최근의 여러 선행 연구들은 대부분 Landsat 영상을 기반

으로 하여 지방자치단체 (특히, 행정동) 차원에서 토지이용 특성 및 LST (land surface temperature)의 분포를 비교·검토하는 기법을 활용하고 있는 것으로 나타났다. Hong *et al.* (2008)은 직접 조사가 힘든 비접근 지역인 북한 전역을 대상으로 Landsat TM 위성영상을 이용하여 논, 밭, 산림, 나지, 초지, 물, 건물·주거지 등 10개의 분류항목에 대한 토지피복도를 작성한 바 있다. 이처럼 위성영상을 이용한 원격탐사 기술은 넓은 지역에 대한 정보 수집이 용이하여 토지이용 및 분류에 대한 시간적·공간적 변화를 분석하는 데 효율적으로 사용할 수 있는 장점이 있다고 보고하였다. Kim *et al.* (2014)은 급속한 도시화를 겪고 있는 세종시를 대상으로 도시열섬 효과를 파악하고 도시화와 지표온도의 상관관계를 분석하였으며, 이를 위해 Landsat 영상을 확보하고 식생지수 (NDVI; normalized difference vegetation index) 및 LST를 도출하여 활용하였다. 또, Kim *et al.* (2018)은 Landsat-8 위성영상을 활용하여 세종시의 시계열 토지피복도를 생성하고 LST를 산출하여, 이를 기반으로 동, 읍, 면 단위로 구분된 대상지역에 대해 열섬포텐셜 (열섬현상 발생가능성)을 분석하였다. 해외지역을 대상으로 Landsat 위성영상을 적용한 사례로서, Suld and Cho (2016)는 몽골의 한 지역에 위성영상과 LST 및 NDVI 등을 적용함으로써, LST와 NDVI와의 상관성이 높고, 해당 지역의 토지피복 변화 및 식생이 LST와 밀접하게 관련되어 있음을 밝혔다. Song (2005)은 Landsat 위성영상을 도시의 확장과 지표온도의 변화를 탐지하는 데 활용한 연구에서 시계열 영상을 이용하여 토지피복 및 토지이용 분류를 수행함으로써 도시의 변화를 분석하고, 도시화에 따른 LST의 변화 양상을 조사하였다. 이를 통해 도심지의 팽창을 수치적·정량적으로 파악하고, 도시화에 수반되는 LST의 상승 경향을 보고하였다. 또한, Cho *et al.* (2016)은 위성영상을 활용하여 도시 열섬현상을 연구하는 경우, 많은 장점에도 불구하고 해상도의 한계와 기상 상태에 따른 대기 중 수증기량 등의 영향으로 인하여 정밀한 지표온도를 관측하는 데 여러 어려움이 따른다는 점을 지적한 바 있다.

한편, 고양시는 조용한 농촌지역의 성격을 강하게 갖고 있다가 1990년대 이후 인접한 서울시의 위성(衛星)적 성격을 갖도록 일산신도시를 중심으로 개발된 전형적 계획도시(1기 신도시)라고 할 수 있다. 1990년에는 24만 명이던 인구가 최근(2014년)에는 백만 명을 초과함으로써 근래 30년 동안 가장 빠르게 성장한 수도권을 대표하는 거대도시가 되었다(http://www.goyang.go.kr/www/statistics/BD_select-StatisticsView.do). 이 과정은 대규모 아파트단지가 집중적, 지속적으로 건설됨으로써 도시환경의 압축적 변화를 유발하였다. 이러한 급속한 도시화와 이에 따른 열섬현상의 심화 등 도시환경의 변모에도 불구하고 고양시를 대상으로 한 체계적인 연구는 거의 보고된 바 없다.

따라서, 본 연구는 고양시를 대상으로 하여 위성영상과 GIS 기법을 연계활용함으로써 도시 내 열섬우심지구를 상세하고 명확하게 특정하고, 비교·검토하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 2010~2020년에 걸쳐 하절기 지상 기상관측자료(AWS; automatic weather station)의 기온 변동양상에 대해 시계열적 기초통계분석을 실시하였다. 또, 2010~2020년에 걸쳐 하절기(5~9월)의 Landsat 위성영상을 최대한 확보하고, 각 영상에 대해 일차적 검증을 거쳐 양호한 위성

영상들을 선별하고, 이들을 개별적으로 또는 중첩처리함으로써 LST 분포지도들을 산출하였다. 이 결과를 일차적으로 행정동 단위로 비교함으로써 그 단점 및 한계를 검토하였다. 특히, 열섬우심지구를 보다 구체적으로 특정·추출하기 위한 목적으로 LST 분포지도의 군집화 방법론(클러스터링)을 새롭게 제안하였다. 또, 이를 위해 여러 시행착오를 거쳐 인구 백만 명 수준의 도시 규모에서 열섬우심지구를 추출하는 데 적합한 것으로 판단되는 적정 해상도와 추출상한값을 제안하였다. 본 연구를 통해 제안된 방법론을 적용하여 고양시의 열섬우심지구를 추출하여 제시하는 한편, 적절한 대책 수립이 요구되는 지구들을 순위별로 비교·검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 고양시 개요

고양시는 경기도 서북부에 위치하여 동쪽으로는 양주시, 서쪽으로는 김포시, 남쪽으로는 서울시, 북쪽으로는 파주시와 접하고 있다. 고양시의 연평균기온은 12.5°C로 경기도의 11.2°C보다 높아 열섬현상이 우려되고 있다(Korea Meteorological Administration,

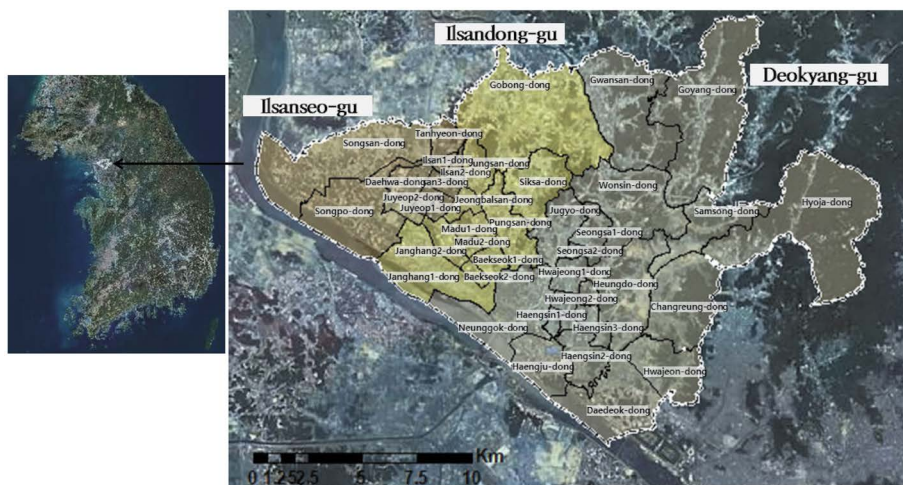


Fig. 1. Location of Goyang-si and layout of each administrative-dong.

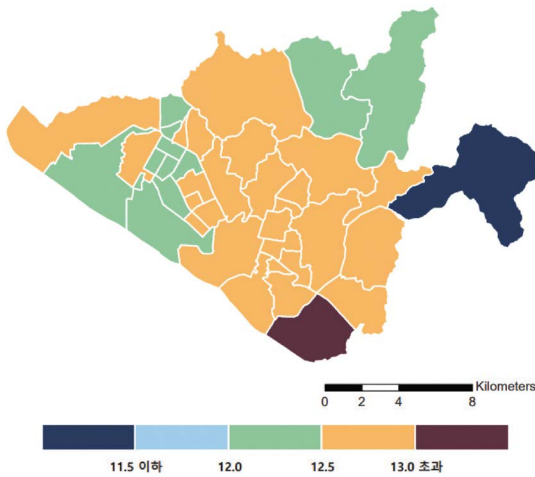


Fig. 2. Average annual temperature of each administrative-dong in Goyang-si.

2017). 특히, 인구가 밀집해 있는 도심지역에서 이에 대한 우려가 큼에도 불구하고 기초자료 조사 및 원인 분석이 미흡한 실정이다. 고양시의 행정구역은 덕양구, 일산동구 및 일산서구 등 3개의 구와 39개의 행정동으로 이루어져 있다. 2019년 12월 현재 총인구는 106만 6천명이며, 총면적은 268.1 km²로서 경기도 총면적(10,183.5 km²)의 2.6%에 해당한다. 고양시에서 가장 면적이 넓은 곳은 효자동(25.4 km²)이며, 가장 작은 곳은 마두2동(0.6 km²)이다(Ministry of the Interior and Safety, 2020). 고양시는 동쪽과 북쪽이 높고 서쪽과 남쪽이 낮은 지형이다. 동북쪽으로 북한산(836 m), 노적봉(716 m) 등의 높은 산이 위치하고, 한강이 시의 남쪽과 서쪽 경계를 따라 동에서 서로 흐르고 있다(그림 1).

향후 고양시에서는 기후변화의 영향으로 폭염과 열대야 현상으로 대표되는 열섬현상이 더 심해질 것으로 예상되고 있다. 한편, 이와 같은 상황은 도시 전체에서 동일하게 나타나는 것이 아니라 도심지역을 중심으로 더욱 강하게 나타날 것으로 예측된다. 하지만 기존의 보고들은 그림 2의 사례가 보여주고 있는 바와 같이 대부분 행정동 차원의 단순비교에만 그치고 있어 여러 한계가 있었다. 도시 내에서 열섬현상이 심

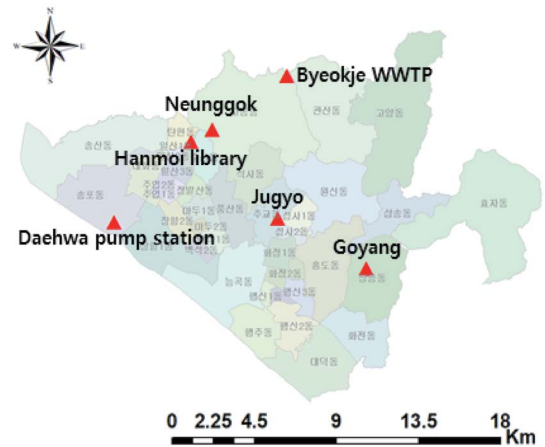


Fig. 3. Positions of each AWS in Goyang-si.

하게 나타나는 지구(地區, District)들을 행정동 차원보다 상세하고 명확하게 높은 정확도로 특정할 수 있게 된다면 이들을 중심으로 더 실질적인 대책을 수립하는 것이 가능해질 것으로 기대된다.

2.2 지상 기상관측자료 검토

2010~2020년에 걸쳐 하절기(7~9월의 3개월간) AWS의 기온변화 패턴에 대해 시계열적 기초통계분석을 실시하였다. 기온 극한값으로서 최고온도(폭염일수)와 최저온도(열대야일수)를 중심으로 검토하였다. 고양시 내에 있는 AWS는 그림 3에 나타난 바와 같이 관리주체별로 경기도가 1곳(주교), 고양시가 3곳(한피도서관, 대화펌프장 및 벽제하수처리장) 및 기상청이 2곳(고양, 능곡)으로 모두 6곳에 이른다.

2.3 위성영상을 이용한 지표온도분포 추출

2.3.1 위성영상을 활용한 지표온도분포 추출 과정

위성영상으로부터 LST의 분포지도를 추출하기 위하여 미국지질조사국(USGS; United States Geological Survey)에서 제공하는 Earth explorer 및 GloVis를 활용하였다(<https://glovis.usgs.gov/>). 우선, 위성을 통해 수집된 영상에 대해 밴드 및 좌표 검토와 보정 등 전처리 과정을 수행하였다. 전처리한 영상을 복사량

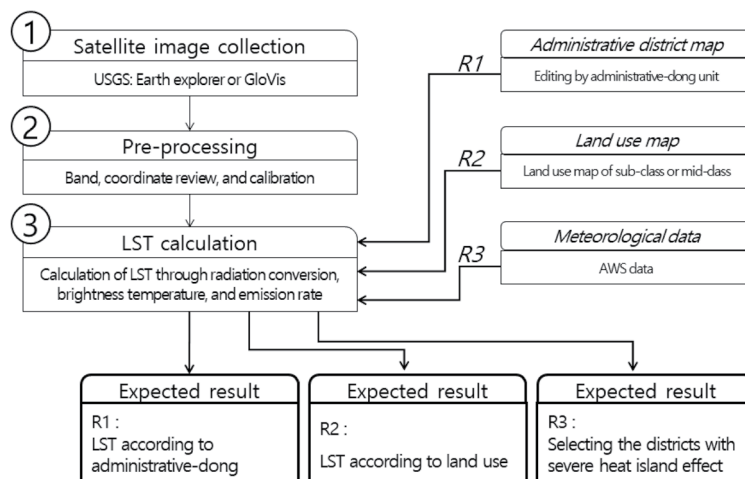


Fig. 4. Extraction procedure of land surface temperature distribution using satellite images.

으로 환산하고, 밝기온도 및 방출률을 계산하여 LST를 산출하였다. 산출된 LST를 행정구역도 및 토지이용도와 결합시켜 시각적 결과물을 도출한 후 비교·검토하였다. 위성영상을 활용한 LST 분포지도의 추출 과정은 그림 4와 같다.

2.3.2 위성영상의 수집 및 선별

위성영상은 2010~2020년까지 최근 11년간의 자료를 활용하였다. USGS에서 제공하는 자료 중에서 Landsat5 및 8의 영상을 활용하였으며, Landsat7 영상은 센서 이상에 따른 노이즈 현상으로 인해 모두 제외하였다. Landsat 영상은 해당 지역별로 설정되어 있는 Path-Row로 검색하며, 우리나라는 북한을 포함하여 총 23개의 Path-Row로 구성된다. 이 중에서 고양시는 Path-Row 116-34에 포함된다. 당초 영상자료의 수집 기간은 하절기(6~8월)로 설정하고자 하였으나 장마철로 인해 구름이 낀 영상이 많아 충분한 수의 영상을 확보하기 위하여 5월과 9월까지 확대하였다. 해당 기간 동안 총 72매의 Landsat 영상을 취득하였으며, 영상 선별시 운량(cloud) 및 잡음(noise)이 발생한 자료는 각각 육안 검토하여 제외하였다. 최종적으로 모두 21매의 영상을 선별하였다. 선별된 영상은 표 1과 같다. Landsat5의 영상 2매를 제외하면 모두 Landsat8의 영

Table 1. Selected images and sensors.

Date	Time	Sensor	Cloud (%)
2010. 06. 04.	11:01:44	Landsat5	13.00
2010. 07. 06.	11:01:35	Landsat5	9.00
2013. 05. 11.	11:12:57	Landsat8	12.48
2013. 09. 16.	11:13:01	Landsat8	0.29
2014. 05. 14.	11:10:37	Landsat8	14.79
2014. 05. 30.	11:10:38	Landsat8	2.22
2014. 06. 15.	11:10:45	Landsat8	37.36
2014. 08. 02.	11:11:02	Landsat8	44.25
2014. 09. 19.	11:11:10	Landsat8	0.15
2015. 06. 02.	11:10:11	Landsat8	39.23
2015. 09. 22.	11:11:01	Landsat8	1.38
2016. 05. 19.	11:10:38	Landsat8	0.10
2016. 07. 22.	11:11:02	Landsat8	25.75
2016. 09. 24.	11:11:17	Landsat8	1.35
2017. 06. 23.	11:10:48	Landsat8	5.25
2017. 08. 26.	11:11:08	Landsat8	16.40
2018. 05. 25.	11:09:56	Landsat8	12.88
2019. 05. 28.	11:10:44	Landsat8	30.75
2019. 06. 13.	11:10:51	Landsat8	2.15
2020. 05. 30.	11:10:31	Landsat8	12.35
2020. 09. 19.	11:11:19	Landsat8	21.32

상인 것으로 나타났다. 좌표는 WGS1984 UTM zone 52N으로 확인되었다. 선별된 영상들이 촬영된 시간은 모두 오전 11시 1분~13분까지의 좁은 시간대 내에 분포하였다.

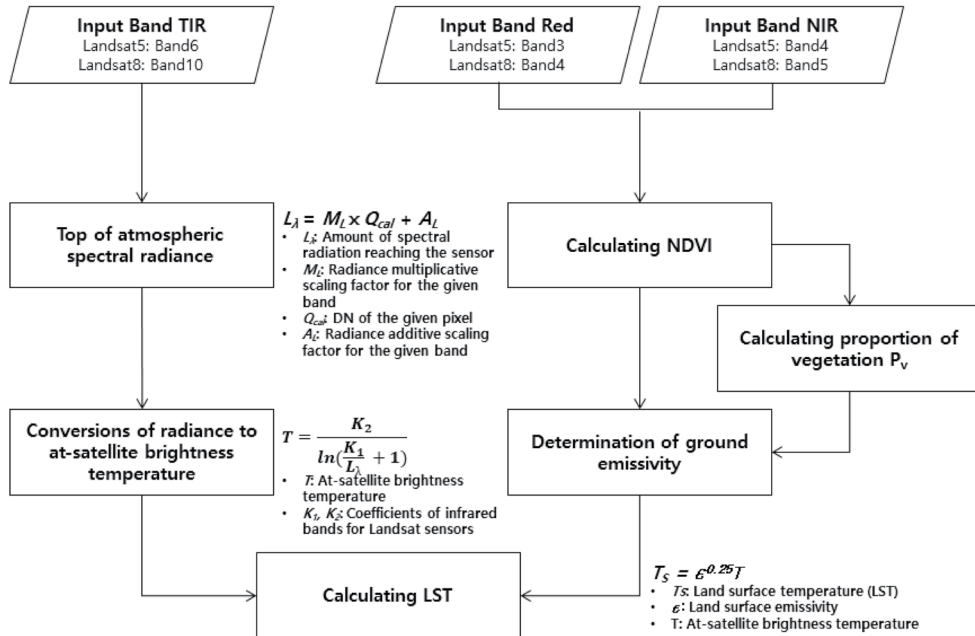


Fig. 5. Calculation flow of LST.

2.3.3 지표온도의 산정방법 및 모델 구축

Landsat 위성자료는 각 채널별로 관측된 에너지량을 DN 값 (digital number)의 형태로 제공한다. 따라서, LST를 추출하기 위해서는 복사전달방정식 및 NDVI 등을 이용하여 산출하는 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서 활용한 LST 산정방법은 그림 5와 같다. 먼저 Landsat의 적외선 밴드를 추출하고, 이를 이용하여 위성의 관측센서에 도달하는 복사량으로 환산하는 과정이 필요하다(Chander and Markham, 2003).

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

여기에서, L_{λ} 는 센서에 도달하는 스펙트럼 복사량(단위: $W/m^2/srad/\mu m$), M_L 은 해당 밴드에 대한 Radiance multiplicative scaling factor, Q_{cal} 은 해당 화소에 대한 관측 정량화된 복사에너지(DN) 및 A_L 은 해당 밴드에 대한 Radiance additive scaling factor를 의미한다. 다음으로, 환산된 복사량을 바탕으로 Landsat 영상의 각 센서에 해당하는 보정식을 활용하여 밝기

Table 2. Landsat thermal band calibration constants.

Sensor	Band	K_1	K_2
TM	Band6 (Resolution: 120 m)	607.76	1260.56
OLI/TIRS	Band10 (Resolution: 100 m)	774.89	1321.08

온도를 계산한다. 이에 대한 추정식은 NASA에서 제공하고 있으며, 식 2와 같다(<https://glovis.usgs.gov/>).

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

여기에서, T 는 밝기온도(단위: K)이며, K_1 및 K_2 는 센서 적외선 밴드의 보정계수(단위: $W/(m^2 \cdot srad \cdot \mu m)$)를 의미한다. 적용된 값은 표 2와 같다.

방출률을 계산하기 위하여 아래의 식 3과 같이 근적외선 밴드와 적색 밴드를 이용하여 정규화된 식생지수를 산출하였다.

$$NDVI = \frac{Band_{NIR} - Band_{Red}}{Band_{NIR} + Band_{Red}} \quad (3)$$

여기에서, $NDVI$ 는 정규화된 식생지수이며, $Band_{NIR}$ 은 근적외선 밴드, $Band_{Red}$ 은 적색 밴드를 의미한다.

지표면 방출률을 산정하는 데 $NDVI$ 값을 이용하였으며, 본 논문에서 이에 대한 자세한 논의는 생략하였다(Ko and Cho, 2020; Sekertekin and Bonafoni, 2020; Juan *et al.*, 2006).

$$\epsilon = 0.004 \times P_v + 0.986 \quad (4)$$

여기에서, ϵ 는 지표면 방출률을, P_v 는 $NDVI$ 값을 활용하여 산출되는 식생의 비율을 의미한다. 마지막으로 LST 를 산정하였다.

$$T_s = \epsilon^{0.25} T \quad (5)$$

여기에서, T_s (단위: K)는 LST 이며, T 는 밝기온도를 의미한다. 한편, 이상의 LST 모델은 model builder를 활용하여 GIS 환경에서 구동할 수 있도록 구축하였다.

2.4 토지이용 현황 분석

토지이용 현황을 분석하는 데 있어 영상을 이용한 분류항목의 설정기법은 연구목적과 활용도에 따라 다른데, USGS의 원격탐사 자료를 이용한 토지피복 분류시스템에서는 도식지, 인공건조물, 농경지, 방목지, 산림, 물, 습지, 나지, 툰드라 및 만년설의 9개 항목으로 분류하며, 전 세계적으로 널리 활용되고 있다(Anderson *et al.*, 1976). 이를 기본으로 지역에 맞게 수정하여 사용하는 경우가 대부분이며, 또한 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 우수실행지침(Good Practice Guidance)에서 토지이용 범주를 크게 임야, 경작지, 초지, 습지, 주거지 및 기타 토지의 6개로 구분하고 있다(Hong *et al.*, 2008).

한편, 우리나라 환경부의 환경공간정보서비스에서 제공하는 토지피복 분류체계는 다음과 같다(<https://egis.me.go.kr/main.do>). 1985년 유럽환경청(EEA; Europe Environment Agency)에서 추진된 CORINE(Coordination of Information on the Environment) 프로젝트의 개념을 기반으로 우리나라 실정에 맞는 분류기준을 확정하여 1998년 환경부에서 최초로 남한

지역에 대한 대분류 토지피복도를 구축하였다. 토지피복도는 해상도에 따라 대분류(해상도 30 m급), 중분류(해상도 5 m급) 및 세분류(해상도 1 m급)의 3가지 위계를 가지고 있다. 대분류는 우리나라의 대표적인 7가지 토지피복으로 이루어져 있으며, 영상자료를 기준으로 토지피복 경계 및 속성을 분류하고, 분류가 모호한 지역은 참조자료를 활용하여 분류한다. 분류항목 및 기준에 따라 중분류 22개 및 세분류 41개 항목으로 세분화된다. 환경부에서 제공하는 토지피복도 분류체계에 따라 고양시의 토지이용 특성을 분석하였다.

본 연구에서는 2019년에 제작이 완료된 환경부의 세분류 체계 자료를 활용하여 고양시의 토지이용 특성을 분석하였다. 자료의 특성상 각 분류 코드마다 모든 폴리곤이 분할되기 때문에 코드별로 병합(merge)하는 전처리 과정을 수행하였다. 북한과의 접경지역이기 때문에 일산서구의 3개 동(대화동, 송산동 및 송포동) 일부 지역에 대해서는 토지이용도를 확보하지 못하였다.

2.5 지표온도분포 클러스터링을 통한

열섬우심지구 추출

본 연구를 통해 확보한 LST 영상을 이용하여 열섬우심지구를 추출하고자 하였다. 이를 위해 ① 21매의 LST 영상을 활용하여 공간합성(DN 값 합성)을 실시하고, ② 200 m 해상도를 갖는 온도 포인트를 생성하고, ③ LST 추출상한값(LST_ULE ; LST_upper limit of extraction)보다 큰 상위 화소들을 추출하고, ④ 추출된 화소들을 대상으로 격자구조를 생성하고 군집화를 수행하였다. ⑤ 마지막으로 도출된 군집들을 대상으로 열섬우심지구 여부를 검토하고 토지이용 특성과 비교분석하였다. 이상의 과정을 순차적으로 도시하면 그림 6과 같다.

본 연구에 적용된 적외선 밴드의 해상도는 Landsat5의 TM 센서에 대해 120 m, Landsat8의 OLI/TIRS 센서에 대해 100 m에 해당한다(표 2 참조). 또, $NDVI$ 를 산출하기 위해 사용하는 근적외선 밴드와 적색 밴드의 해상도는 모두 30 m에 해당한다. 따라서, 각 센서가 갖고 있는 상이한 해상도를 공통으로 고려한

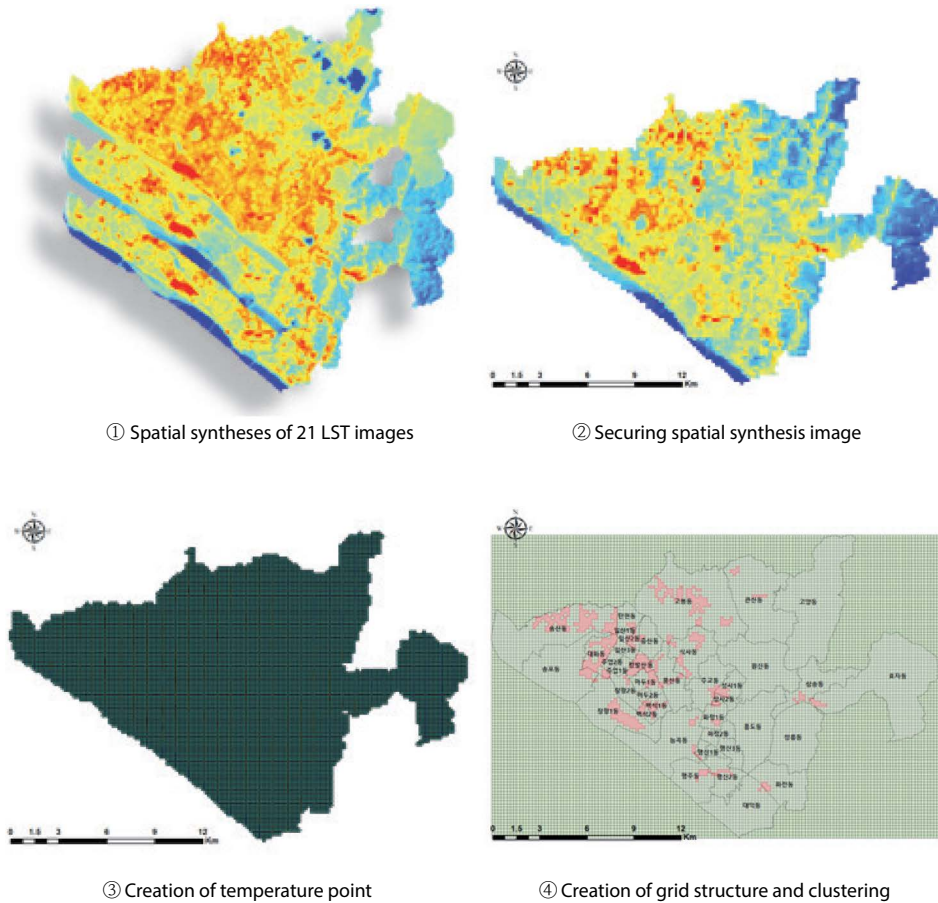


Fig. 6. Extraction flow of severe heat island districts through LST clustering.

LST의 종합해상도로써, 서로 다른 해상도를 모두 포괄하면서도 열섬우심지역에 대한 지구단위 검토에 적합한 수준으로 200 m급의 해상도를 선정하였다. 이상의 논의를 바탕으로 본 연구에서는 “열섬우심지구”를 “200 m 해상도로 변환된 공간합성 위성영상으로부터 LST를 생성하고, LST_ULE 이상의 값을 갖는 상위 화소들을 추출했을 때 각 화소들이 클러스터를 형성하는 지구”로 정의하였다. 한편 클러스터는 최소한 5개 이상의 화소들이 연결한 지구로 정의하였다(단위 클러스터의 면적 $\geq 0.2 \text{ km}^2$). 적정한 LST_ULE 수준에 대해서는 고양시의 사례를 중심으로 아래의 결과 및 고찰에서 추가로 논의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고양시 열대야일수 및 폭염일수 분석

AWS 기상자료를 활용하여 7~9월의 일 최저 및 최고 온도를 기준으로 열대야 및 폭염 일수를 분석하였다. 열대야일수는 일 최저온도가 25°C 이상인 경우, 폭염일수는 일 최고온도가 33°C 이상인 경우의 일수로 정의하였다. 분석결과 고양시의 열대야일수와 폭염일수는 최근 5년이 그 이전 5년에 비해 뚜렷하게 증가하고 있는 것으로 나타났다. 이 분석 결과의 한 예시로서, 그림 7은 각 연도별로 7~8월 2개월에 걸쳐 최고기온이 33°C 를 넘는 폭염일수를 도시한 결과이다.

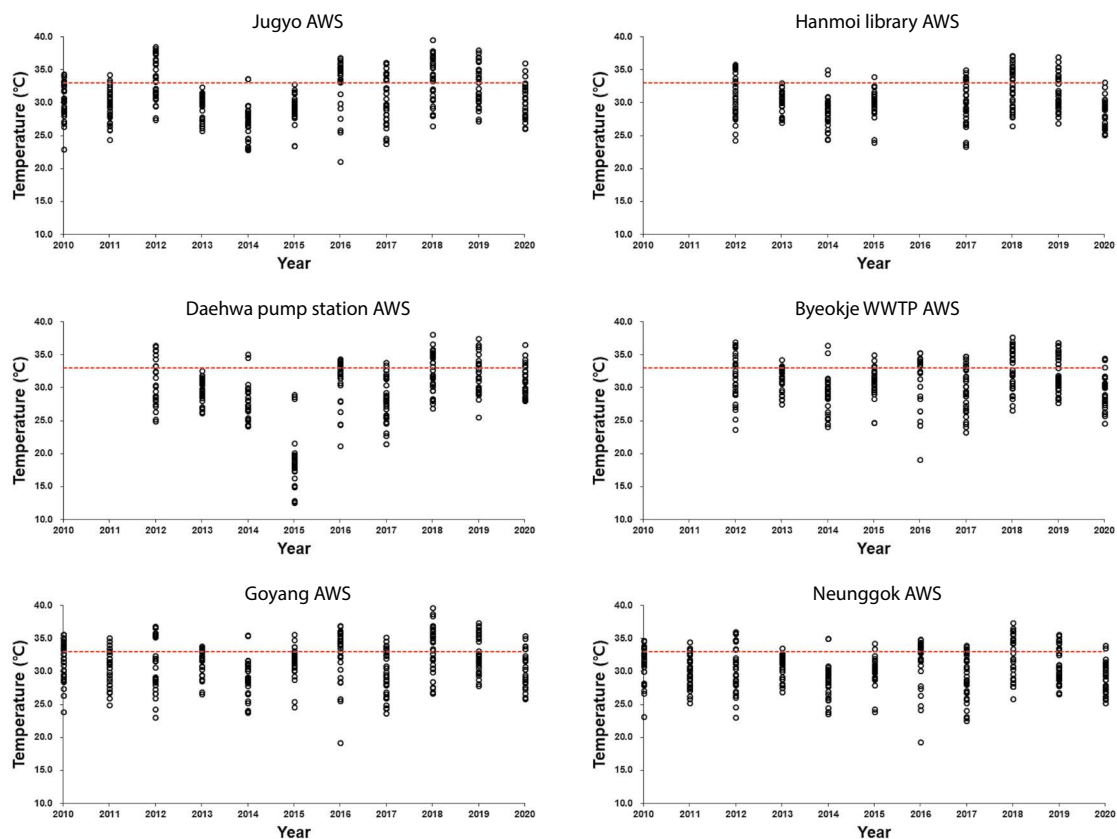


Fig. 7. Highest temperature analysis during July and August (2010~2020).

오랜 여름장마가 장기간 지속됐던 2020년을 제외하면 그 이전의 5개년에 비해 2016~2019년의 5개년 동안 뚜렷한 폭염일수의 증가가 관찰되었다.

3.2 고양시 토지이용 현황 분석

전체리를 마친 고양시의 구(區)단위 토지이용 현황은 다음의 그림 8 및 표 3과 같다. 고양시의 토지이용 현황은 대분류 기준으로 산림지역과 시가화/건조지역이 각각 31.0%와 21.4%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 다음으로 농업 14.9%, 초지 12.0%, 나지 6.0%, 수역 3.4% 및 습지 1.6% 순으로 나타났다. 일산서구의 일부 토지(25.82 km²)에 대해서는 자료가 제공되지 않아 분석하지 못하였다.

행정동별 토지이용 현황을 살펴보면, 시가화지역

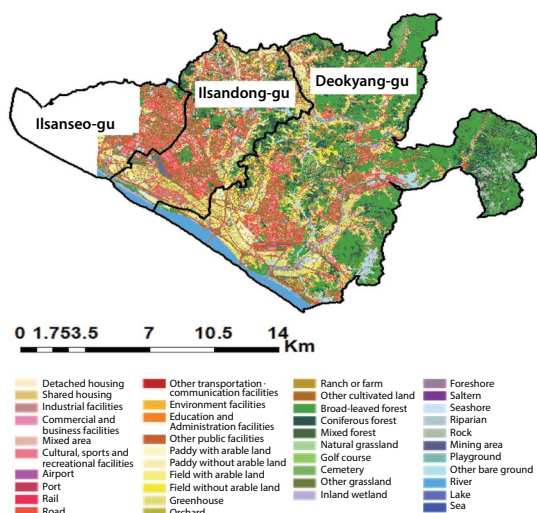


Fig. 8. Land use status map of Goyang-si.

Table 3. Land use status of Goyang-si.

Major class code	Description	Mid-class code	Description	Sub-class code	Description	Area (km ²)	Percentage (%)
100	Urbanization/ dry area	110	Residential area	111	Detached housing	3.149	1.18
				112	Shared housing	3.382	1.27
		120	Industrial area	121	Industrial facilities	2.179	0.82
		130	Commercial area	131	Commercial and business facilities	7.003	2.63
				132	Mixed area	0.074	0.03
		140	Cultural, sports and recreational facilities	141	Cultural, sports and recreational facilities	1.218	0.46
		150	Transportation area	153	Rail	0.899	0.34
				154	Road	36.822	13.81
				155	Other transportation · communication facilities	0.068	0.03
		160	Public facilities area	161	Environment facilities	0.325	0.12
162	Education and Administration facilities			0.717	0.27		
163	Other public facilities			1.225	0.46		
200	Agricultural area	210	Paddy field	211	Paddy with arable land	3.366	1.26
				212	Paddy without arable land	4.296	1.61
		220	Field	221	Field with arable land	2.975	1.12
				222	Field without arable land	16.312	6.12
		230	Greenhouse	231	Greenhouse	9.456	3.55
		240	Orchard	241	Orchard	0.721	0.27
250	Other cultivated land	251	Ranch or farm	0.489	0.18		
		252	Other cultivated land	2.185	0.82		
300	Forest area	310	Broad-leaved forest	311	Broad-leaved forest	57.125	21.43
		320	Coniferous forest	321	Coniferous forest	12.420	4.66
		330	Mixed forest	331	Mixed forest	12.994	4.87
400	Grassland	410	Natural grassland	411	Natural grassland	0.979	0.37
		420	Artificial grassland	421	Golf course	1.597	0.60
				422	Cemetery	3.408	1.28
423	Other grassland			25.985	9.75		

Table 3. Continued.

Major class code	Description	Mid-class code	Description	Sub-class code	Description	Area (km ²)	Percentage (%)
500	Wetland	510	Inland wetland	511	Inland wetland	4.226	1.59
600	Bare ground	610	Natural bare ground	612	Riparian	0.292	0.11
				613	Rock	2.097	0.79
		620	Other bare ground	622	Playground	0.827	0.31
				623	Other bare ground	12.821	4.81
700	Water	710	Inland water	711	River	8.639	3.24
				712	Lake	0.473	0.18
Sum	-	-	-	-	-	240.744	90.34

(도심)의 비율이 가장 높은 곳은 백석2동(83.9%)이며, 정발산동 82.7%, 일산2동 80.9%, 주엽1동 74.4%, 일산 1동 72.2%, 대화동 71.1%, 행신1동 70.0% 및 주엽2동 69.7%의 순으로 나타났다. 한편, 열섬현상을 저감할 것으로 기대되는 농업, 산림, 초지, 습지, 나지 및 수역과 같이 투수율이 높은 토지이용 특성을 갖는 행정동으로는 효자동이 96.9%로 가장 높고, 고양동 89.5%, 화전동 88.6%, 원신동 86.1%, 창릉동 85.0%, 관산동 83.6%, 대덕동 82.2% 및 주교동 80.3% 순으로 나타났다. 이처럼 고양시의 토지이용 특성은 구별로, 행정동 별로 매우 큰 편차를 갖고 있는 것으로 확인되었다.

3.3 위성영상을 이용한 고양시 지표온도분포 분석

3.3.1 고양시 전체 지표온도분포 분석 결과

2010~2020년에 걸친 21매의 Landsat 위성영상을 활용하여 고양시의 LST 분포를 분석한 결과는 다음의 그림 9와 같다. 5월에 촬영된 영상이 7매, 6월이 5매, 7월이 2매, 8월이 2매 및 9월이 5매로 나타났다. 상대적으로 7월과 8월의 영상이 각 2매로 희소하고, 5월, 6월 및 9월의 영상이 다수임을 알 수 있었다. 따라서, 영상 취득시기를 6~8월에 한정하지 않고 5~9월까지로 확대한 것은 적절했던 것으로 판단하였다. 고양시의 LST 분포는 최소 19.6~최대 39.2°C의 범위 내에서 영상별로, 촬영시기별로 미세한 차이는 있으나, 시가화가 진행된 도심지를 중심으로 일정한 경향성을 갖고 유사하게 높은 LST 값을 갖는 지역들이 관찰되고 있는 점, 동북 방면으로 튀어나와 있는 북한산 자락에서 모두 유사한 패턴으로 LST 값이 낮은 지역들이 산포하고 있는 점 등으로 미루어 각 영상들은 대체로 동질적인 LST 분포를 갖고 있으며 중첩처리하여 활용하는데 적절한 것으로 판단하였다.

위의 LST 분포지도들에서 특히 빨강계 부각되고 있는 한강변에 위치하고 있는 지역은 장항동의 공장들이 밀집해 있는 곳으로, 별도의 녹지대 없이 함석 재질을 갖는 동일한 형태의 공장지붕들이 연속적, 집중적으로 분포하고 있기 때문인 것으로 판단된다(그림 10).

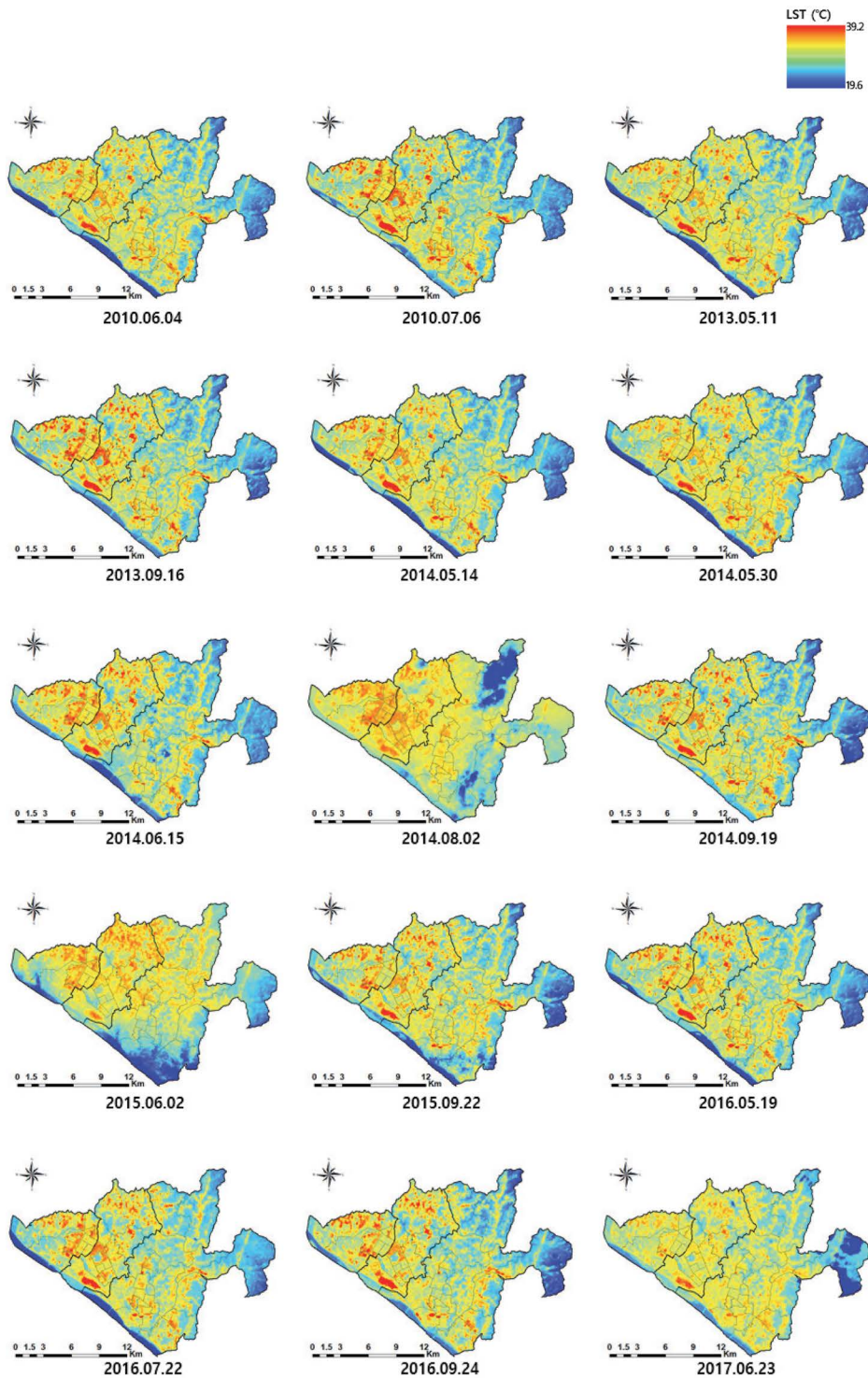


Fig. 9. LST analysis results of Goyang-si (2010~2020).

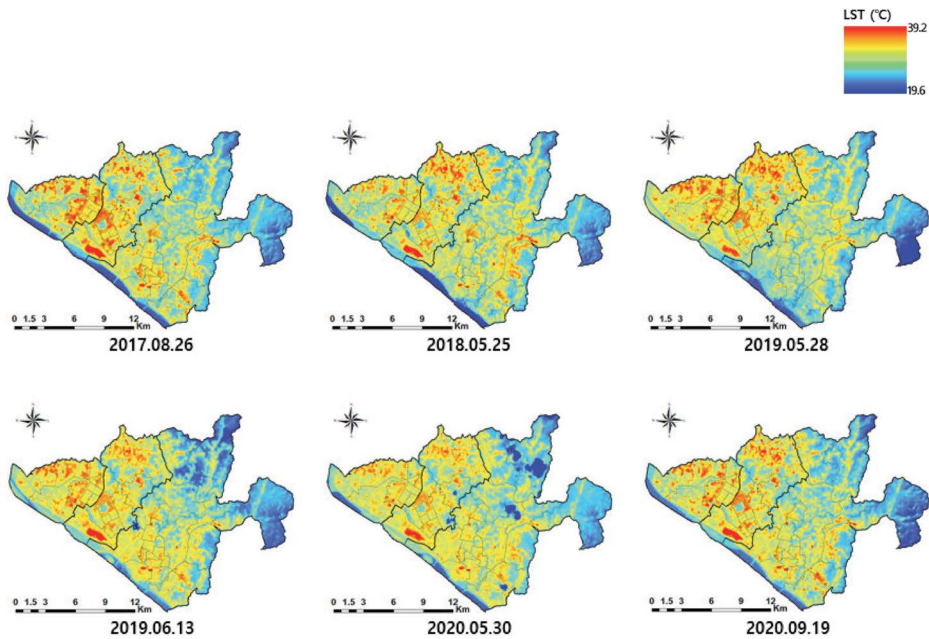


Fig. 9. Continued.

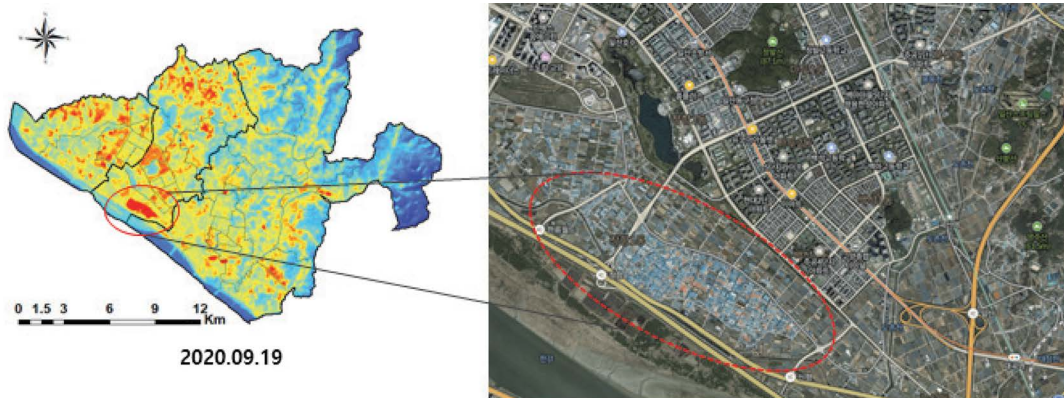


Fig. 10. Specification of the outstanding factory area.

3.3.2 행정동별 평균온도를 기준으로 한 열섬우심지역 분석 결과

2010~2020년까지 분석된 21개의 LST 추출 결과에 대해 고양시 39개 행정동별 평균온도를 내림차순으로 정리하였다. 또, 매 분석 시마다 평균온도가 높은 상위 10개의 행정동을 추출하고, 이를 활용하여 누적

빈도를 산출한 결과는 그림 11과 같다(최대 21회). 정발산동 21건, 일산2동 21건, 일산1동 21건, 대화동 21건, 백석2동 19건, 백석1동 19건, 주엽2동 15건 및 주엽1동 13건의 순으로 빈도가 높게 나타났다. 누적빈도가 21건에 해당하는 행정동들은 전체 추출 결과에서 항상 평균온도가 높은 상위 10개 동에 포함되고 있

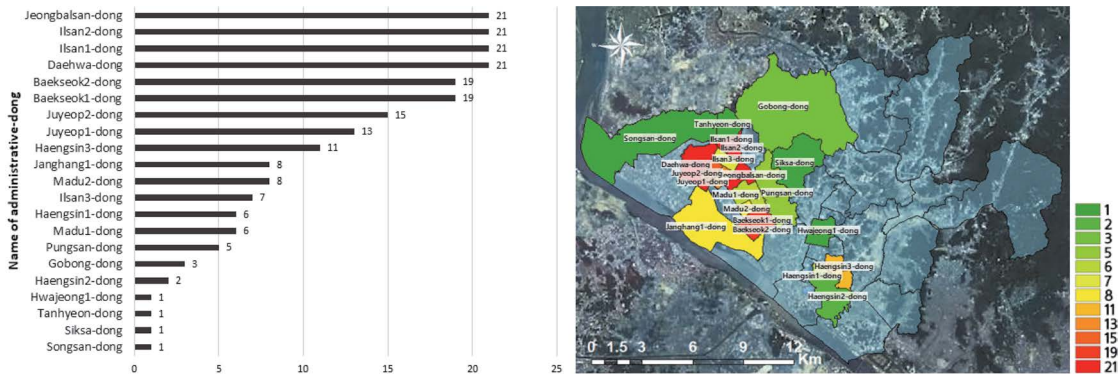


Fig. 11. Distribution of average LST values according to each administrative-dong (descending results by cumulative frequency).

음을 의미한다. 따라서, 누적빈도가 높은 행정동들을 중심으로 열섬현상 저감대책을 수립하는 것이 유효한 전략의 하나가 될 수 있을 것으로 판단된다.

누적빈도를 기준으로 LST가 높은 순위에 따라 각 행정동들을 다음과 같이 4개 지역으로 구분하여 추가 분석을 실시한 결과는 그림 12와 같다. ① 1등급 지역: 누적빈도 최상위(13~21)인 지역, ② 2등급 지역: 누적빈도 상위(5~12)인 지역, ③ 3등급 지역: 누적빈도 중위(1~4)인 지역 및 ④ 4등급 지역: 누적빈도 하위(0)인 지역으로 구분하였다. 또한, 각 등급별로 누적빈도가 가장 높은 3개 행정동을 선정하여 LST 분포 특성과 토지이용 특성을 비교·검토하였다. 분석 결과, 1등급 지역인 정발산동(82.7%), 일산2동(80.9%) 및 일산1동(72.2%) 등에서는 시가지지역의 비율이 약 70% 이상으로 현저히 높은 분율을 차지하는 것으로 나타났다. 한편, 2~3등급 지역으로 갈수록 시가지지역의 비율은 현저히 줄어드는 경향을 보이며(2등급 지역 평균: 49.5%, 3등급 지역 평균: 35.8%), 4등급 지역에서는 농업/산림/초지의 비율이 대부분을 차지하는 것으로 나타났다(시가지지역의 평균: 12.2%).

3.4 지표온도분포 클러스터링 기법을 활용한

열섬우심지구 추출기법 검토

본 연구를 통한 가장 흥미로운 결과는 도시 내 열섬우심지구를 추출하는 새로운 방법론으로서 LST 클러

스터링 기법을 제안한 점이다. 위에서 논의한 행정동별 평균온도를 기준으로 하여 열섬우심지역을 도출하게 되면 좁은 면적을 갖고 있고 도시화가 진전된 행정동일수록 선정될 가능성이 커지게 되고, 설사 지구단위 규모에서는 심각한 열섬현상을 겪고 있다고 하더라도 상대적으로 큰 면적을 갖는 행정동의 경우에는 대책 수립과정에서 배제될 개연성이 크다고 할 것이다. 뿐만 아니라 이상과 같은 방법을 사용하게 되면 행정동 단위로만 분석이 가능할 뿐이어서, 지구단위에서 보다 높은 정확도로 열섬우심지구를 특정하여 맞춤형 대책을 마련하는 데에는 그다지 도움이 되지 않을 수도 있을 것이다.

Cho *et al.* (2019)이 수행한 선행 연구에서는 서울시를 대상으로 Hotspot 분석을 실시하여 423개의 행정동 중에서 62개 행정동을 열섬우심지역 그룹 1(HH 그룹)로 선정하였다. 또한 Ko and Cho (2020)가 수행한 연구에서도 도시 내에서 열 환경에 가장 취약한 곳을 특정하기 위하여 통계적으로 유의미하게 LST가 높은 Hotspot 지역을 동 단위로 추출하고 그 대책을 논의하고 있다. 이러한 연구들은 모두 유사하게 동 단위의 비교검토를 수행하고 있다는 점에서 근본적인 한계를 갖는다고 판단하였다.

이상과 같은 기존 연구들이 갖는 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서 제안하고 있는 LST 클러스터링 기법에서 가장 핵심적인 부분은 “200 m 해상도의

Land use	1 st grade (13 ≤ frequency ≤ 21)			2 nd grade (5 ≤ frequency ≤ 12)			3 rd grade (1 ≤ frequency ≤ 4)			4 th grade (frequency = 0)		
	Jeongbalsan -dong	Ilsan2 -dong	Ilsan1 -dong	Haengsin3 -dong	Janghang1 -dong	Madu2 -dong	Gobong -dong	Haengsin2 -dong	Hwajeong1 -dong	Jugyo -dong	Wonsin -dong	Hyoja -dong
Urbanization/dry area	82.7	80.9	72.2	58.3	27.0	63.2	27.9	31.6	47.8	19.7	13.9	3.1
Agricultural area	0.4	1.3	0.4	9.3	35.0	0.0	21.7	15.9	22.3	25.6	21.2	2.6
Forest area	0.0	0.3	0.0	7.3	4.0	0.0	27.9	15.7	5.8	35.5	36.7	77.3
Grassland	14.7	13.0	8.2	18.8	11.1	31.2	13.0	20.7	18.7	13.6	20.0	3.3
Wetland	0.0	0.0	0.0	0.6	8.1	0.0	1.4	4.3	0.4	1.1	1.5	0.7
Bare ground	2.2	4.6	3.1	5.3	4.5	5.6	7.3	9.5	5.1	4.2	5.9	12.9
Water	0.0	0.0	0.0	0.4	10.4	0.0	0.9	2.2	0.0	0.2	0.8	0.2

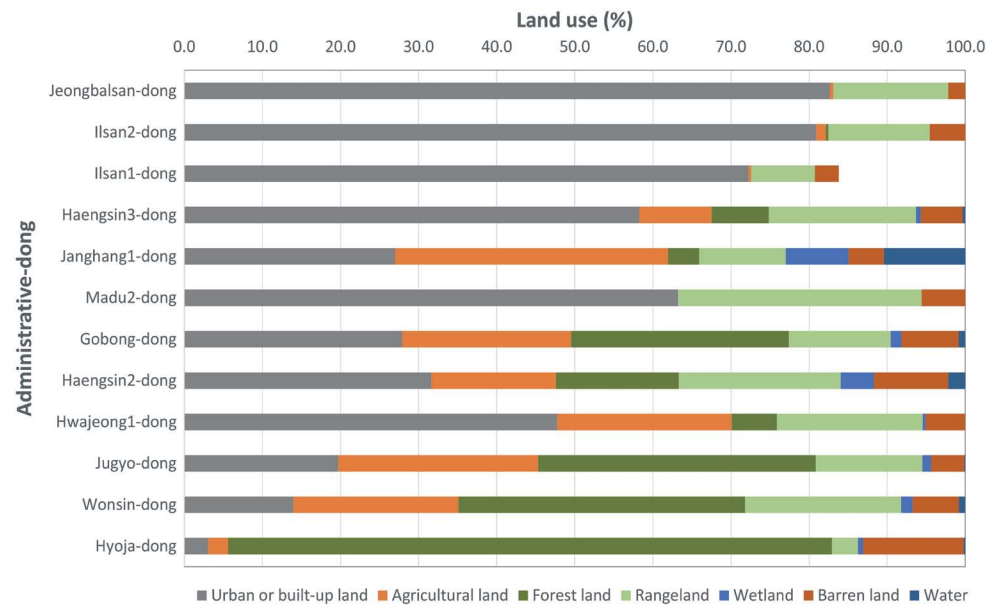


Fig. 12. Land use characteristics of each administrative-dong based on cumulative frequency analysis (2010~2020).

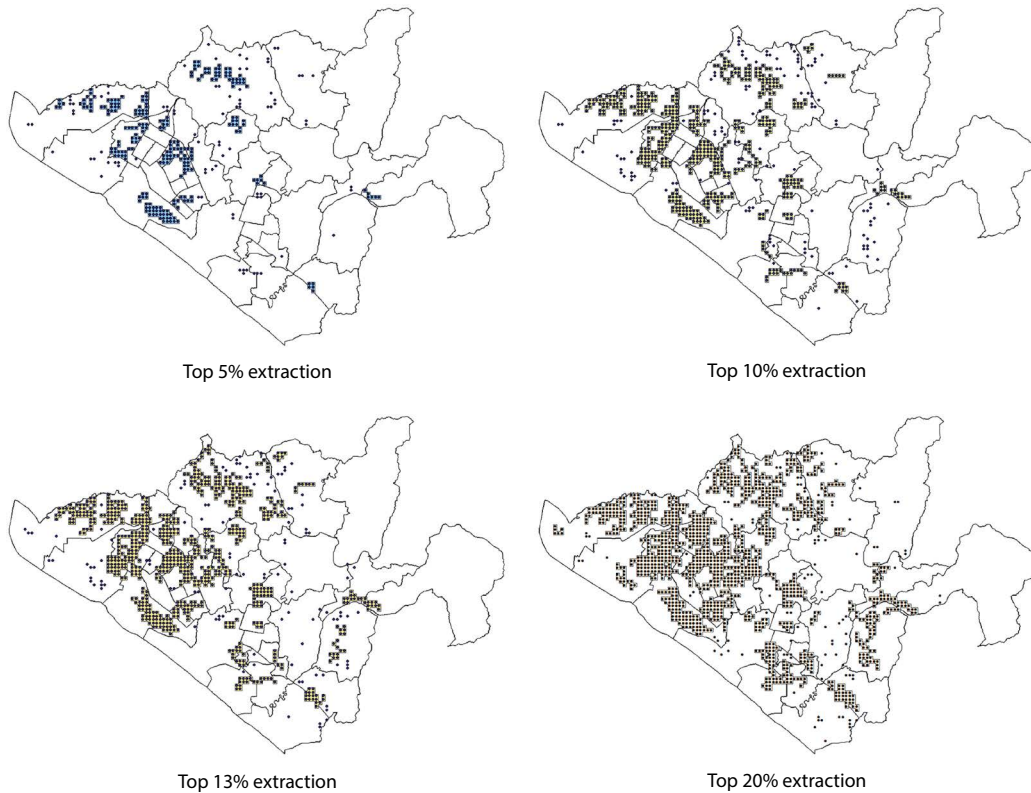


Fig. 13. Review on the decision of LST_ULE (upper limit of extraction).

LST 분포지도상에서 상위 몇 % (LST 추출상한값, LST_ULE)까지의 화소들을 추출하여 군집화를 수행하는 것이 적정인가”를 결정하는 데 있다. 본 연구에서는 적절한 LST_ULE 값을 결정하기 위해 그림 13과 같이 상위 5, 10, 13 및 20%의 경우에 대해 시행착오적으로 검토하였다. 각 작업 과정에는 폴리곤 격자를 생성한 후 수작업과 육안판독을 통해 해당 클러스터의 선택 여부를 결정함과 동시에 선정된 클러스터들의 열섬우심지구로서의 적합성을 판정해야 하는 수고로움이 따랐다. 열섬우심지구로서의 적합성 측면에서 본 연구진은 열섬 대책을 수립하는 데 합당한 규모를 갖고 있는지(너무 크거나 작지는 않은지), 토지이용 특성을 명확히 파악할 수 있는지(주변의 다른 지구와 명확히 구분되는 토지이용 특성을 갖고 있는지) 등을 고려하여 판단하였다. 이 과정에서 LST_ULE의 선정

기준을 높일수록 클러스터링 되는 구역의 면적이 급격하게 확대되는 경향성을 갖게 되기 때문에, “어느 지점을 중심으로 인근 어디까지가 열섬우심지구에 해당한다”라는 결론을 도출하기 어려워지는 문제가 발생하였다. 예를 들어, LST_ULE를 상위 5%로 설정하면 그림 13의 좌상단에서 도시하고 있는 바와 같이 소수의 열섬우심지구가 선정되는데, 도시 차원에서 열섬우심지구의 분포 특성을 개관하는 데에는 선정된 격자의 수가 다소 부족한 것으로 판단하였다. 한편, LST_ULE를 상위 20%로 상향하면 우하단에서 도시하고 있는 바와 같이 대부분의 시가지화지역이 모두 포함되기 때문에 열섬우심지구를 더욱 구체적으로 특정하고자 하는 본 연구의 취지에 부합하지 않는 것으로 판단하였다. 그림 14에서는 LST_ULE를 상위 10%에서 13%로 상향하게 됨에 따라, 검정과 빨강 사각형으

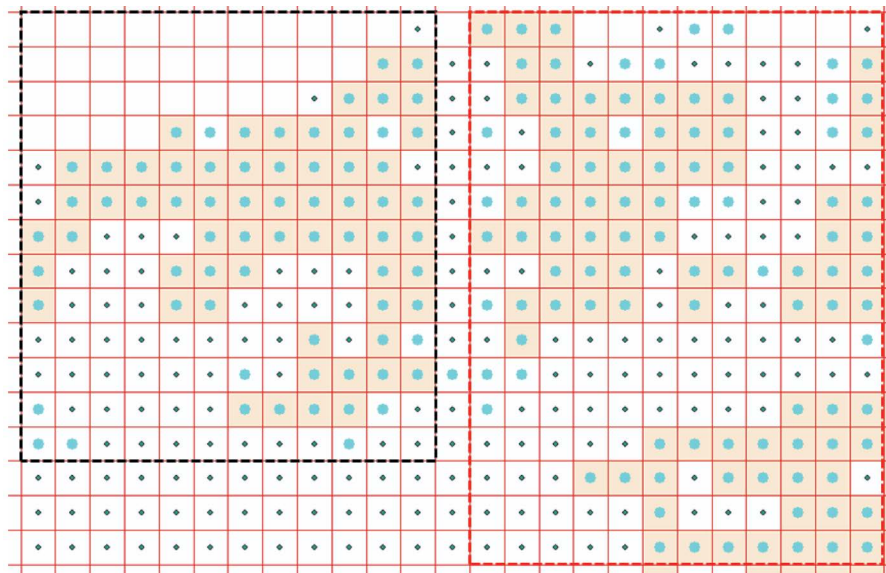


Fig. 14. Example of cluster's excessive expansion: For the case of LST_ULE 10%, the two districts were separated into different clusters (black cluster and red one), but for LST_ULE 13%, the two were consolidated into one cluster and expanded excessively.

로 각각 구분되던 2개의 클러스터가 크게 확장되면서 단일 클러스터로 통합되는 하나의 예를 보여주고 있다. 즉, 고양시의 경우에는 상위 10%를 초과하면 클러스터의 광역화가 급격하게 발생하는 것으로 나타났다.

이상의 검토를 바탕으로 본 연구에서는 상위 10%의 화소들을 추출한 다음 클러스터링을 진행하는 것이 적절한 것으로 판단하였다. 이 경우 모두 27개의 클러스터가 도출되었다.

3.5 지표온도분포 클러스터링 기법을 활용한 고양시 열섬우심지구 검토

고양시를 대상으로, LST_ULE 상위 10% 이내에 해당하는 화소들을 추출한 다음 클러스터링을 진행한 결과는 그림 15와 같다. 모두 27개의 클러스터가 도출되었다. 본 연구에서는 LST 순위(그림 15의 좌하)와 클러스터의 면적 순위(그림 15의 우하)에 대해 각각 정리하였다.

상위 10개의 지구에 대해서 LST 순위로 정리한 결과는 표 4와 같다. 평균 LST 값은 29.1~31.6°C의 범위에

에 걸쳐 있는 것으로 나타났다. 30°C를 넘는 열섬우심 지구도 13곳에 이르렀다. 클러스터의 면적 순으로 상위 10개의 지구에 대해서 정리한 결과는 표 5와 같다. 추출된 열섬우심지구의 면적이 1 km² 이상에 달해 상대적으로 넓은 지구에 대한 종합적인 대책이 필요한 곳은 모두 7개 클러스터에 이르는 것으로 나타났다. LST 값이 높은 상위 10개 지구와 면적이 넓은 상위 10개 지구 중에서 중복되는 클러스터는 모두 5곳인 것으로 확인되었다(표 4의 1, 5, 6, 8 및 10 클러스터와 표 5의 1, 3, 5, 6 및 7 클러스터). 따라서, 고양시의 경우에는 LST 값이 높으면서 상대적으로 넓은 면적을 갖고 있는 위 5개의 열섬우심지구를 중심으로 대책을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안한 방법론의 하나의 활용 예로서, 고양시에서 추출된 열섬우심지구들 중에서 면적이 넓은 상위 4개의 지구에 대해 토지이용 특성과 결부하여 보다 상세하게 확인한 결과는 그림 16과 같다. 1순위인 지구는 3.48 km²의 면적에 걸쳐, 충분한 녹지공간 없이 신도시형 아파트 단지가 뺄뺄하게 도열해 있

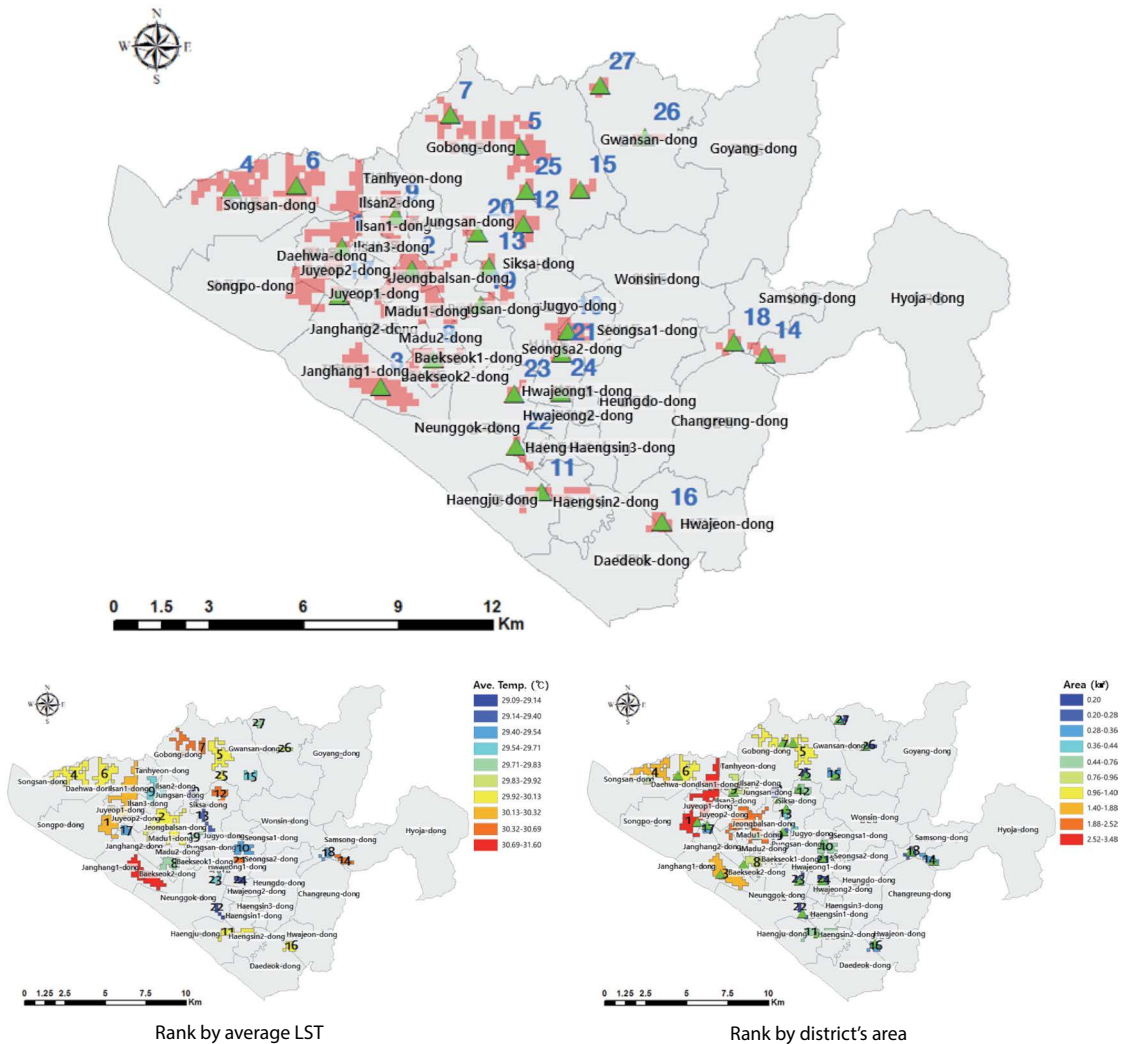
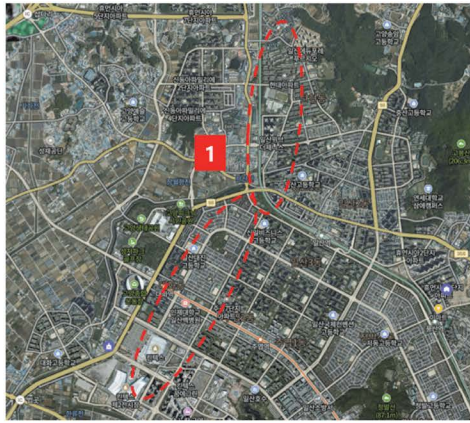
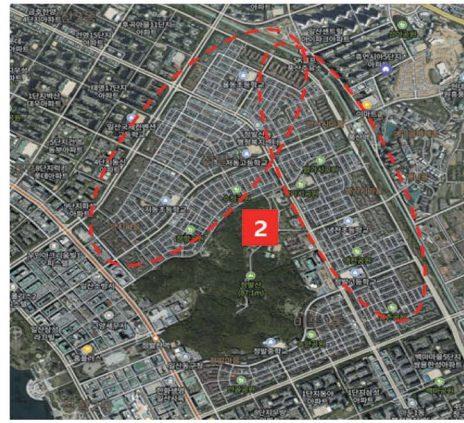


Fig. 15. Results of extracting the severe heat island districts in Goyang-si.

Table 4. Ranks of extracted severe heat island districts by its average LST.

Rank	Latitude	Longitude	Address of representative pixel	Average LST (°C)	Area (km ²)
1	37.639	126.77	**-*, Jangdae-gil, Ilsandong-gu	31.604	1.88
2	37.686	126.819	**, Gyeondalsan-ro 225, Ilsandong-gu	30.691	0.64
3	37.651	126.907	***, Samsung-ro, Deogyang-gu	30.657	0.36
4	37.65	126.834	**, Eullim-ro, Deogyang-gu	30.581	0.24
5	37.717	126.792	**, Gobong-ro 678, Ilsandong-gu	30.557	1.32
6	37.678	126.755	***, Daesan-ro, Ilsanseo-gu	30.315	3.48
7	37.696	126.82	***, Gyeondalsan-ro, Ilsandong-gu	30.128	0.20
8	37.696	126.738	***-**, Deogi-ro, Ilsanseo-gu	30.088	1.36
9	37.61	126.828	***-*, Haengju-ro, Deogyang-gu	30.082	0.68
10	37.709	126.817	***, Munbong-gil 62, Ilsandong-gu	30.046	1.40

1st district: downtown (3.48 km²)2nd district: downtown (2.52 km²)3rd district: industrial zone (1.88 km²)4th district: industrial zone (1.76 km²)**Fig. 16.** Detailed review on the top 4 districts according to their area rankings.**Table 5.** Ranks of extracted severe heat island districts by its area.

Rank	Latitude	Longitude	Address of representative pixel	Average LST (°C)	Area (km ²)
1	37.678	126.755	***, Daesan-ro, Ilsanseo-gu	30.315	3.48
2	37.673	126.78	***, Ilsan-ro, Ilsandong-gu	30.038	2.52
3	37.639	126.77	**_**, Jangdae-gil, Ilsandong-gu	31.604	1.88
4	37.694	126.714	**, Deoksan-ro, Ilsanseo-gu	30.031	1.76
5	37.709	126.817	**_*, Munbong-gil 62, Ilsandong-gu	30.046	1.40
6	37.696	126.738	***_**, Deogi-ro, Ilsanseo-gu	30.088	1.36
7	37.717	126.792	**, Gobong-ro 678, Ilsandong-gu	30.557	1.32
8	37.647	126.788	**_*, Baekseok-ro 86, Ilsandong-gu	29.830	0.96
9	37.688	126.774	**, Tanjung-ro 471, Ilsanseo-gu	29.707	0.88
10	37.656	126.836	***, Hoguk-ro, Deogyang-gu	29.533	0.76

는 지역으로 확인되었다. 2순위인 지구 역시 잘 계획된 신도시 주거지역으로 고층의 아파트 단지가 빼곡하게 들어서 있는 지역인 것으로 확인되었다. 한편, 3순위와 4순위 지구는 각각 1.88 km² 및 1.76 km²의 유

사한 면적을 갖고 있으며, 일산신도시 주변에 산재하고 있는 저층의 공장 밀집지대로 확인되었다. 이러한 공장지대에는 충분한 녹지대가 형성돼 있지 않고, 바람길에 대한 고려 없이 공장이 밀집해 있으며, 함석

재질의 공장지붕들이 연속적으로 늘어서 있어 열섬현상에 취약할 것으로 판단된다.

참고로, 본 논문에서 충분히 논의하지 못한 부분의 하나로서, AWS 측정결과와 LST 산출결과의 검증과정을 들 수 있다. 최근의 위성영상을 확보한 2020년 5월 20일 및 9월 19일 오전 11시 시점에 대해 고양시 인근 11개 도시(북춘천, 철원, 동두천, 파주, 춘천, 서울, 인천, 수원, 강화, 양평 및 이천)의 AWS 실측값과 LST 산출값에 대해 선형회귀분석한 결과는($AWS_temp. = 1.21 \times LST + 0.71$ ($R^2 = 0.63$))와 같았다($n = 22$). 즉, 회귀계수, 회귀상수 및 결정계수 모두 상당한 오차를 내포하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문의 결과를 이해하고 활용하는 과정에 있어서도 지표면의 방출률이 LST의 산정에 큰 영향을 미치고, NDVI를 이용한 방출률 산정방법은 대기투과도 등의 영향으로 인해 적지 않은 오차를 내포할 수 있다는 점에 대한 충분한 고려가 필요하다는 점을 지적해 둔다(Cho *et al.*, 2016; Suld and Cho, 2016).

4. 결 론

고양시의 연평균기온은 경기도에 비해 1.3°C 이상 높아 열섬현상의 심화가 우려되고 있다. 특히, 인구가 밀집해 있는 도심지역의 열섬현상에 대한 우려가 크에도 불구하고, 이에 대한 기초자료 조사 및 원인분석이 미흡한 실정이다. 도시 내 열섬우심지역을 도출하기 위해 수행된 기존 선행연구들은 대부분 위성영상을 기반으로 하여 행정동 규모에서 토지이용 특성 및 지표온도(LST; land surface temperature)의 분포를 비교·검토하는 기법을 활용하고 있다. 본 연구에서는 인구 백만 규모의 고양시를 대상으로 위성영상과 GIS 기법을 연계활용하여 도시 내 열섬우심지구를 보다 상세하게 특정하는 방법론을 제시하고, 그 결과물을 도출하는 것을 목적으로 하였다. 본 연구의 주요한 연구결과는 다음과 같다.

1. 2010~2020년에 걸쳐 하절기(5~9월)의 위성영상

21매를 확보하고, 각 영상들을 중첩처리하여 LST 분포를 산출하였다. 이후 행정동 단위로 LST 분포 및 토지이용 특성을 비교·검토한 결과, 면적이 넓은 경우가 많고 토지이용 특성의 편차가 커 열섬우심지구를 구체적으로 특정하기에는 여러 한계점이 드러났다.

2. 본 연구에서는 열섬우심지구를 보다 높은 정확도로 추출하기 위하여 새로운 LST 분포지도의 군집화 방법론(클러스터링)을 제안하였다. 또, 인구 백만 명 수준의 고양시 규모에서 열섬우심지구를 추출하는 데 적합한 것으로 판단되는 적정 해상도와 추출상한값을 제안하였다. 적정 해상도로서 200m급의 해상도를 제안하였다. 적정 LST 추출상한값(LST_ULE; LST_upper limit of extraction)으로 상위 10% 전후를 제안하였다.

3. “열섬우심지구”를 “200 m 해상도로 변환된 공간 합성 위성영상으로부터 LST를 생성하고, LST_ULE 이상의 값을 갖는 상위 화소들을 추출했을 때 각 화소들이 클러스터를 형성하는 지구”로 정의하였다.

4. 고양시를 대상으로 새로운 방법론을 적용하여 열섬우심지구를 추출한 결과 모두 27곳이 도출되었다. 평균 LST 값은 29.1~31.6°C의 범위를 나타내었으며, 30°C를 넘는 곳도 13곳에 이르렀다. 면적 순으로 정리한 결과, 1 km² 이상에 달해 종합적인 대책이 필요한 곳도 7곳에 이르는 것으로 나타났다. 고양시에서는 LST 값이 높고 면적도 넓은 5곳의 열섬우심지구를 특정할 수 있었다.

5. 고양시의 열섬우심지구에 대해 면적이 넓은 4곳을 우선 검토한 결과, 상위 1, 2위 지구는 일산서구(대화동 및 탄현 지역), 일산동구(정발산동 인근)의 아파트가 고밀집해 있는 시가지로 나타났으며, 상위 3, 4위 지구는 신도시 주변으로 밀집해 있는 공장지대(장항1동 등)인 것으로 나타났다.

6. 인구 백만 명 수준의 도시에서 높은 정확도로 열섬우심지구를 추출하고 각 지구별 토지이용 특성에 맞는 적절한 열섬 저감대책을 수립하는 데 있어, 본 연구에서 제안한 “위성영상 기반 LST 군집화 방법론(클러스터링)”이 유효할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 (2021 0154)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Anderson, J.-R., Hardy, E.-E., Roach, J.-T., Witmer, R.-E. (1976) A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data, Geological Survey Professional Paper 954, United States Government Printing Office, Washington.
- Chander, G., Markham, B. (2003) Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674-2677. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818464>
- Cho, C.-Y., Jee, J.-B., Park, M.-S., Park, S.-H., Choi, Y.-J. (2016) Comparison of Surface Temperatures between Thermal Infrared Image and Landsat 8 Satellite, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 46-56, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.046>
- Cho, H.-M., Ha, J.-H., Lee, S.-G. (2019) Exploring Physical Environments, Demographic and Socioeconomic Characteristics of Urban Heat Island Effect Areas In Seoul, Korea, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 35(4), 61-73, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.22669/kras.2019.35.4.061>
- Chun, J.-M., Lee, S.-Y., Kim, K.-R., Choi, Y.-J. (2014) A Study of the Urban Heat Island in Seoul Using Local Analysis System, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(2), 119-127, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.2.119>
- Hong, J.-W., Hong, J.-K., Lee, S.-E., Lee, J.-W. (2013) Spatial Distribution of Urban Heat Island Based on Local Climate Zone of Automatic Weather Station in Seoul Metropolitan Area, *Atmosphere*, 23(4), 413-424, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2013.23.4.413>
- Hong, S.-Y., Rim, S.-K., Lee, S.-H., Lee, J.-C., Kim, Y.-H. (2008) Spatial Analysis of Agro-Environment of North Korea Using Remote Sensing_I. Landcover Classification from Landsat TM Imagery and Topography Analysis in North Korea, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 27(2), 120-132, (in Korean with English abstract). <https://egis.me.go.kr/main.do> (accessed on June 14, 2021).
- <https://geography.name/urban-heat-island/> (accessed on June 14, 2021).
- <https://glovis.usgs.gov/> (accessed on June 14, 2021).
- <https://glovis.usgs.gov/> (accessed on June 14, 2021).
- http://www.goyang.go.kr/www/statistics/BD_selectStatisticsView.do/ (accessed on July 24, 2021).
- Hwang, J.-W., Kim, S.-Ch. (2003) A Comparative Analysis on the Urban Heat Island by Residential Types, *Journal of Korea Planning Association*, 38(7), 235-244, (in Korean with English abstract).
- Howard, L. (1833) The Climate of London, International Association for Urban Climate.
- Juan, C.-J., Jose, A.-S., Alan, G., Donald, S., William, T.-G. (2006) Improved Land Surface Emissivities over Agricultural Areas Using ASTER NDVI, *Remote Sensing of Environment*, 103, 474-487. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.04.012>
- Kim, M.-K., Kim, S.-P., Kim, N.-H., Shon, H.-G. (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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.3.1033>
- Kim, S.-B., Kim, G.-H., Cho, J.-H. (2001) The Urban Heat Island Phenomenon and Potential Mitigation Strategies, *Journal of Nakdonggang Environmental Research Institute*, 6(1), 63-89, (in Korean with English abstract).
- Kim, T.-H., Lee, W.-H., Han, Y.-K. (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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2018.36.4.305>
- Ko, Y.-J., Cho, K.-H. (2020) Analysis of Areas Vulnerable to Urban Heat Island Using Hotspot Analysis - A Case Study in Jeonju City, Jeollabuk-do -, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 48(5), 67-79, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9715/KILA.2020.48.5.067>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2017) Detailed Analysis Report on Climate Change in Gyeonggi-do for the New Climate System.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2020) Administrative

- Districts and Population Status of Local Government. https://www.mois.go.kr/synap/skin/doc.html?fn=BB S_2020052709171828401&rs=/synapFile/202106/&synapUrl=%2Fsynap%2Fskin%2Fdoc.html%3Ffn%3D BBS_2020052709171828401%26rs%3D%2FsynapFile%2F202106%2F&synapMessage=%EC%A0%95% EC%83%81 (accessed on June 14, 2021).
- Myeong, S.-J. (2010) Urban Heat Island Phenomenon: Common Characteristics and Causes of Urban Heat Island Phenomenon, *Urban Affairs*, 45(500), 12-16.
- Sekertekin, A., Bonafoni, S. (2020) Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, And 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation, *International Journal of Remote Sensing*, 2020(12), 1-32. <https://doi.org/10.3390/rs12020294>
- Song, Y.-S. (2005) Detection of Urban Expansion and Surface Temperature Change Using Landsat Satellite Imagery, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 13(4), 59, (in Korean with English abstract).
- Suld, E., Cho, G.-S. (2016) Time Series Analysis of Land Cover Change and Surface Temperature in Tuul-Basin, Mongolia Using Landsat Satellite Image, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, 24(3), 39-47, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7319/kogsis.2016.24.3.039>

Authors Information

김원재 (한국건설기술연구원 환경연구본부 본부장)
 임현만 (한국건설기술연구원 환경연구본부 수석연구원)
 신형섭 (㈜이알아이 대표)