

Landsat 위성영상을 이용한 파주시의 지표면 온도 변화와 NDVI 관계 분석

Analysis of Relationship between Land Surface Temperature Change and NDVI in Paju Using Landsat Satellite Imagery

최진원

Choi, Jin-won

세종대학교 환경에너지공간융합학과

Environment energy & Geoinformatics, Sejong University

KEY WORDS: 도시열섬 현상, 지표면 온도(LST), NDVI, Landsat 위성영상

ABSTRACT: In order to find out the urban heat island phenomenon in Paju, we tried to understand the relationship between NDVI and LST. The analysis was conducted by dividing the past five years and the last five years into five chapters. In addition, there is a possibility that the trend in Paju City is simply limited to Paju City, so NDVI and LST in Seoul and Gyeonggi area were also calculated in the same way as a comparative group. As a result, it was confirmed that NDVI and LST were in a negative correlation. In addition, NDVI in the last 5 years increased by 0.02 on average compared to the past 5 years, and the LST decreased by 1.75° C. It was confirmed that the trend of Paju-si and Seoul showed the same pattern. In addition, Paju-si confirmed that NDVI has improved partially in the last five years from the past five years and found that the LST has decreased accordingly.

1. 서론

지난 1972년 유엔 인간환경 회의에서 “하나뿐인 지구”라는 슬로건 아래 “인간 환경선언”을 채택한 이후 지구 환경 문제는 이제 전 인류가 머리를 맞대고 풀어야 할 과제로 인식하게 되었고 잇달아 다양한 국제협약이 마련되고 있다(Kim, 2010). 이러한 국제 기후 협력을 대변하는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제6차 평가보고서에서 동아시아 지역의 평균 기온이 2.0~5.3°C 상승할 것으로 전망하였다. 국내의 연평균 기온은 최근 30년(1991~2020년)간 과거 30년(1912~1940년)에 비해 연평균기온이 1.6°C 상승하였다(기상청, 2021).

현재의 지구온난화의 가속화 정도는 우리나라의 연평균 기온을 지속적으로 상승케 할 것으로 예상된다. 특히 도시지역의 경우, 지속적인 개발로 인해 녹지 및 수공간의 면적은 감소하고 건축물과 도로의 면적은 증가하여, 인접한 교외지역보다 2~5°C 이상 더 높게 나타나는 ‘도시열섬(UHI, Urban Heat Islands)’이 발생하고 있다(Howard, 1833; Landsberg, 1981). 체감온도 또한 시골지역에 비해 도시지역이 3°C 가량 높게 나타났다(Basara et al., 2010). 따라서 도시의 녹지를 감소는 열섬현상의 발생과 유의미한 연관성을 갖는다고 볼 수 있다. 더 나아가 도시열섬 현상은 도시의 규모, 토지피복과 이용 형태 및

다른 인위적인 원인의 영향을 받고, 에너지 사용 증가, 열적 피해 등의 문제점을 발생시킬 수 있다(Oke et al., 2017; Streutker, 2002). 이는 도시민의 건강 악화와 도시 환경의 수준을 저하시키는 문제로 발전할 수 있다.

이러한 기후변화에 따른 기온상승, 온실효과 및 해수면의 상승으로 기상이변의 빈도는 급격 하게 상승하고 있으며 돌발홍수, 폭설과 같은 기상재해가 증가되고 있다. 기후변화와 더불어 인구가 집중되고 있는 도시는 인위적인 열배출로 인하여 기온상승이 가속화되고 있다. 따라서 도시화에 따른 도시지역의 인위적 환경변화는 기온에 영향을 받기도 하지만 기온에 영향을 주기도 한다. 이러한 도시화에 따른 온도변화의 연구로는 도시열섬 연구가 대표적이며 대부분 지표면 온도 분포와 식생 분포를 이용하여 도시화의 분석이 가능하다(박민호, 2001).

도시열섬현상을 분석하는 연구에서는 주로 원격탐사 방법이 널리 쓰이고 있으며, 위성영상을 이용하여 간접적으로 식생피복을 추정하고자 하는 연구가 활발히 수행되고 있다(Park et al., 2014; Kim and Choi, 2014; Kim and Yeom, 2012). 이러한 선행 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Lee et al.(2001)은 Landsat TM을 활용하여 개발 예정지가 개발됨에 따라 도심의 온도가 상승하였음을 확인하였다. Cheon et al.(2022)은 청주시의 가로수길을 대상으로 가로녹지대가 도시열섬 현상을 완화하는데 중요한 역할

을 수행하고 있음을 확인하였다. Solecki et al(2005)은 녹지의 증가가 도시온도의 저감을 일으켜 에너지 소비 감소 등을 통해 경제적인 효과를 일으킬 수 있다고 밝혔다. Kim et al(2016)은 녹지 증가가 도시의 기온과 체감온도를 저감하는데 효과가 있음이 나타났다. Do et al(2006)는 도시 지표면 온도와 그에 영향을 미치는 토지피복유형, 개발밀도, NDVI의 관계를 명확히 규정하여 도시 녹지공간의 확충을 주장하였다. An et al(2018)은 대구시를 대상으로 산림의 우점식생 종류에 따라 지표면 온도가 유의미한 변화폭을 보였음을 확인하였다. Quan and Lee (2009)는 제주시의 NDVI와 지표면온도 값이 반비례하며, 도시지역의 평균온도는 초지보다 약 5℃ 높으며 산림지역보다 약 10℃ 높음을 제시하였다

도시화에 따른 도시지역의 기온변화 분석은 지상에서 관측된 온도관측을 통하여 이루어지기도 하나 제한적인 관측때문에 인공위성 등의 원격탐사 자료분석을 통하여 수행된다. 특히, 인공위성의 열적외선 센서는 온도에 민감한 복사적 특성을 가지고 있기 때문에 지표면온도를 관측하는데 효과적이다(Jee et al.,2013).

따라서 본 연구에서는 도시지표면 온도 변화에 집중하여 변화의 형태를 NDVI의 변화와 연관 지어 분석하고자 한다. 이를 90년대부터 현재까지 개발이 진행 중인 파주시를 대상으로 GIS 기법과 Landsat 위성영상을 활용하여 지표면 온도를 비교한다. 이를 통해 지표면 온도를 효과적으로 낮출 수 있는 현실적인 방안을 마련하여 도시개발 이후 파주시에서 발생할 가능성이 있는 열섬현상의 예방대책을 제시할 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 변화는 도시의 온도를 낮추는데 그치지 않고 시민의 건강 문제와 탄소배출 완화에도 큰 도움이 될 것이며 진정한 지속가능한 도시개발의 지향점을 제시할 것으로 기대한다.

II. 연구자료 및 영역

1. 연구대상지 및 연구기간

파주시는 경기도의 서북단에 위치한다. 동쪽으로는 양주시, 북쪽으로는 연천군과 북한, 남쪽으로는 고양시와 접하고 서남쪽으로 한강을 경계로 김포시와 인접해 있다(파주시지,2009). 파주시의 평균최고기온은 20년(2002년~2021년)간 서울·경기의 평균최고기온보다 높은 추세에 놓여있어 열섬현상이 우려된다 (Fig 1). 또한 대도시 인구수 기준인 500,000명을 2022년 5월에 넘었음에도 불구하고 파주시에 대한 도시문제와 환경에 대한 연구는 미흡한

실정이다. 파주시의 면적은 672.607km²으로 경기도 면적(10,183.5 km²)의 6.3%를 차지하고 있다. 파주시 동부에는 광주산맥이 북동, 남서 방향으로 솟아 있고 북쪽 경계 너머로 마석령 산맥이 동서로 달리고 있어 동고서저 지형이다(파주시지,2009).



Fig 1. 파주지역 (1:300000)

파주시는 과거 농촌지역이었으나 1994년 완공된 자유로를 기점으로 파주시는 서울과 가까운 위성도시의 역할을 하였다. 그 이후부터 꾸준히 진행된 신도시 개발과 대규모 공장단지 건설, 고속도로 건설 등은 인구유입을 이끌었다. 이러한 대규모 개발은 급속한 도시화를 야기하여 기존의 녹지율 감소로 인해 도시 열섬현상이 심화될 가능성이 농후하다. 이러한 대규모 도시개발이 진행되는 지역임에도 불구하고 도시환경 및 도시 열섬현상을 주제로 하는 연구는 거의 보고된 바가 없다.

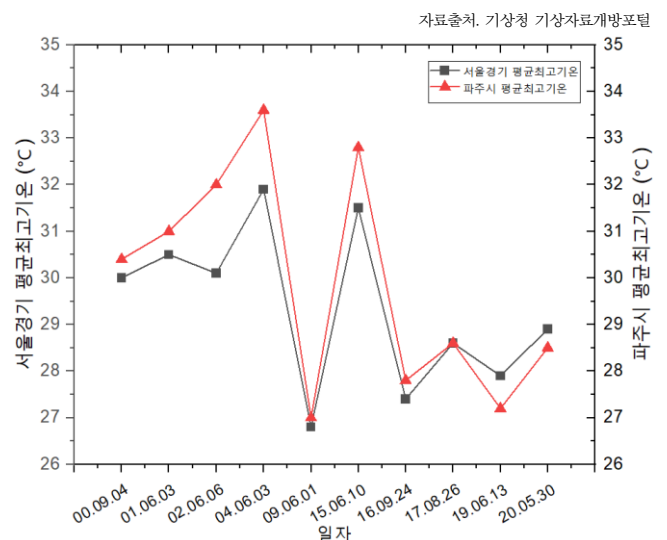


Fig 2. '00~'20 서울경기 일평균최고기온과 파주시 일평균최고기온 비교

파주시가 현재와 같은 도시화가 진행된다면 지구온난화로 인한 여름철 극심한 폭염과 더불어 도시열섬 현상은 더욱 가중될 것으로 전망된다.

서울·경기 지역과 파주지역을 비교하여 파주시의 변화 양상을 알아보도록 한다. 연구 기간은 2000년부터 2020년 범위 내에서 기상조건이 유사하고 비교적 선명한 Landsat 위성자료가 존재하는 일자를 선별한다. 이후 위성사진을 기반으로 지표면 온도를 비교하여 파주시의 실제 변화 추이를 알아본다. 이러한 연구는 변화를 알아보는 데 그치지 않고 변화에 따른 해결책 구상에 도움이 될 것이다.

2. 연구 자료

1) 위성자료

미국 USGS와 NASA가 공동연구로 개발된 Landsat으로부터 관측된 자료는 지표온도를 포함한 지표특성과 산림 등의 다양한 분야에서 이용되고 있다(Landsat 7 Science Data Users Handbook).

파주시와 서울경기의 지표온도를 분석하기 위한 분석영역은 경도 125.2° E부터 127.5° E까지 위도는 36.2° N부터 38.3° N까지의 영역을 선택하였다. 관측시기는 2000년부터 2020년에 걸친 시기에 촬영된 영상을 사용하였다.

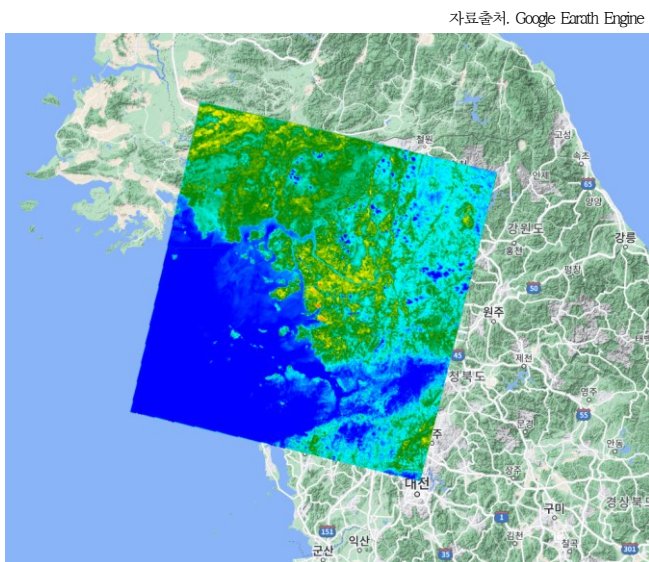


Fig 3. 위성영상 측정 영역

위성자료는 촬영된 연도에 따라 Landsat5, Landsat7, Landsat8로 Landsat 위성으로 다양하다. Landsat 8호 위성 데이터는 연안수의 보다 정밀한 조사와 대기 중 에어로졸 농도 추정을 위하여 연안/에어로졸(coastal/aerosol) 1번

밴드가 추가되어 기존 Landsat 5, 7호와 밴드 구성이 다르다. 아래 Fig4와 같이 Landsat 8호 위성 데이터의 파장은 기존보다 좁은 폭을 갖는 특징이 있다.

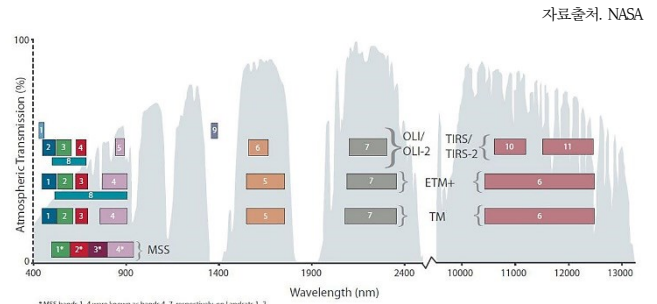


Fig 4. Landsat 위성 시리즈별 측정 파장 범위

2) 기상자료

본 연구자는 기상조건을 알아보기 위해 기상청에서 제공하는 기상자료개방포털을 이용하였다. 해당 포털은 국내 기상 관측소의 과거 기상자료를 기상청 자체 세부기준으로 분류하여 제공하고 있어 자료의 정확도와 신뢰도 측면에서 사용하기에 무리가 없다고 판단하였다. Landsat 위성은 구름에 의해 가려진 부분은 측정이 안되기 때문에 보다 정확한 지표면온도 측정을 위해서는 운량 기준이 중요하다. 운량 설정은 USGS 위성자료센터에서 운량기준 15%로 설정하였다. 15% 미만으로 설정할 경우 산출되는 위성의 수가 현저히 줄어들게 되어 연구에 필요한 충분한 수의 자료를 얻기 어렵다. 또한 비교 대상의 기온조건을 최대한 유사한 기준으로 맞추어 동일한 평균기온에서 발생하는 LST 차이를 알아보려고 하였다.

III. 연구방법

1. 위성영상을 통한 지표온도 추출

지표면온도 변화를 알아보기 위해서는 장기간에 걸쳐 촬영된 여러 장의 Landsat 위성영상이 필수적이다. 기존에는 Landsat 위성영상을 NASA(National Aeronautics and Space Administration) LST 산출 모델 식(1)을 기반으로 하여 지표면 온도를 산출하였다. Landsat 위성영상은 밴드별로 정량화된 복사에너지로 제공되기 때문에 밴드특성을 이용하여 방사 휘도 값으로 변환하고, 이를 다시 지표면 온도로 변환해야 한다(An et al., 2018).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX-LMIN}{QCALMAX-QCALMIN} \right) * (QCAL - QCALMAX) + LMIN \quad (1)$$

여기서, L_{λ} (절대방사휘도): 측정된 분광방사량

$LMIN$ (최소방사휘도)

: $QCAL = 0$ 일 때, 분광복사에너지

$LMAX$ (최대방사휘도)

: $QCAL = QCALMAX$ 일 때, 분광복사에너지

$QCALMIN$: DN단위로 정량화된 최소복사에너지

$QCALMAX$: DN단위로 정량화된 최대복사에너지

$QCAL$: Digital Number, DN

식 (1)로부터 계산된 방사휘도를 아래 식 (2)를 적용하여 절대온도 $T(K)$ 로 변환할 수 있다(NASA, 2002).

$$T(K) = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (2)$$

$T(K)$: 절대온도(Kelvin)

$K1, K2$: 보정상수

L_{λ} : 절대방사휘도

위의 식으로 나온 $T(K)$ 는 절대온도(Kelvin)이므로 섭씨 온도(Celsius)로 변환해주도록 한다. 변환식은 다음과 같다.

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15 \quad (3)$$

본 연구에서 상기 NASA LST 모델식을 소스코드 입력 방식으로 LST 산출이 가능한 Google Earth Engine(GEE)을 활용하였다. GEE는 Google Earth 온라인 플랫폼 내에서 대용량 위성 자료를 쉽게 분석할 수 있다(Sofia L. E., 2020). 연구자가 제공받기를 원하는 영상의 일자와 Landsat 위성의 번호 등을 기입하면 지표면 온도를 상기 식을 기본으로 계산한 LST 위성자료를 제공받을 수 있다.

이번 연구 분석에서는 파주시의 장기 LST 변화추이와 비교하기 위한 대상으로 서울·경기 지역을 선정하였으므로 파주시와 서울·경기 지역의 위성영상을 이용하고자 하였다. 그 가운데 동일한 일자와 동일한 Landsat 위성에 촬영된 파주시와 서울·경기지역 위성영상을 필요했다. 따라서 최종적으로 파주시와 서울·경기지역 각각 20개의 영상을 제공받았다(구름의 가림이 심한 2016년

영상을 제외한 2000년부터 2020년 하절기). 제공받은 위성영상에 대한 정보는 아래 Table2와 같다.

Table 1. 제공받은 파주시 및 서울·경기 지역 LST 위성영상 정보

일자	Landsat no.	일자	Landsat no.
2000년 9월 4일	Landsat 7	2011년 9월 27일	Landsat 5
2001년 6월 3일	Landsat 7	2012년 8월 4일	Landsat 7
2002년 6월 6일	Landsat 7	2013년 9월 16일	Landsat 8
2003년 5월 8일	Landsat 7	2014년 5월 30일	Landsat 8
2004년 6월 3일	Landsat 5	2015년 6월 10일	Landsat 7
2005년 5월 13일	Landsat 7	2016년 9월 24일	Landsat 8
2007년 7월 30일	Landsat 5	2017년 8월 26일	Landsat 8
2008년 9월 26일	Landsat 7	2018년 5월 9일	Landsat 7
2009년 6월 1일	Landsat 5	2019년 6월 13일	Landsat 8
2010년 6월 4일	Landsat 5	2020년 5월 30일	Landsat 8

2. 기상조건으로 비교 위성영상 선정

GEE를 이용하여 도출한 LST 위성영상은 파주시와 서울·경기 지역을 촬영한 영상의 일자와 Landsat 위성이 동일한 조건일 경우에 우선적으로 제공받았다. 따라서 두 영상 간 기상조건이 동일하지 않을 경우가 존재할 수 있다. 따라서 기상청의 기상자료개방포털을 통해 각 일자별 파주시와 서울·경기 평균기온을 비교하였다. 비교 결과, 평균기온이 비교적 동일한 수치를 보이는 일자를 선정하였다(Table2). 영상 간 평균기온을 동일한 조건으로 설정한 후 LST를 비교하는 것이 평균기온 대비 LST의 변화 추세를 파악하는데 도움이 될 것으로 예상하였다.

최종 분석대상으로 선정된 영상은 파주시와 서울·경기 각각 10개에 해당한다. 해당 영상들은 동일한 촬영 일에서 비교적 비슷한 평균기온을 보이고 있다. 이를 2000년부터 2009년은 과거 5개년 LST, 2015년부터 2020년은 최근 5개년 LST로 분류하여 과거와 최근의 파주시 LST 추이를 분석한다.

Table 2. 파주시 및 서울경기 지역 일평균기온 자료

일자	파주시	서울·경기	일자	파주시	서울·경기
2000년 9월 4일	23.3℃	24.9℃	2015년 6월 10일	22.4℃	23.2℃
2001년 6월 3일	21.3℃	22.2℃	2016년 9월 24일	19.2℃	21.3℃
2002년 6월 6일	23.4℃	24.3℃	2017년 8월 26일	20.6℃	23.6℃
2004년 6월 3일	23.3℃	24℃	2019년 6월 13일	20.6℃	21.8℃
2009년 6월 1일	19.4℃	20.2℃	2020년 5월 30일	20.3℃	21.5℃

자료출처. 기상청 기상자료개방포털

3. NDVI 계산

NDVI(Normal Distribution Vegetation Index)는 식생의 활력 상태를 정량적으로 나타내는 정규화 식생지수로, 식생의 분포량 및 활동성을 조사하는 방법 중 하나이다(Chen et al., 2004). NDVI는 잎의 면적, 수목의 높이, 수종, 식생 분포 면적 등을 정량적으로 나타낼 수 있는 척도이다. NDVI 값은 -1에서 1의 범위로 표현되며 1에 가까울수록 식생이 많이 분포하는 지역으로 식생활력도가 높게 나타난다. 반면 -1에 가까울수록 식생이 많이 분포하지 않으며 식생활력도가 낮은 지역으로 나타난다. 영상데이터를 이용하는 NDVI는 지표면의 반사율을 측정하여 산정하며, 수치적으로 표현되는 산정 값을 이용하여 다양한 모델에서 식생의 수평 밀도를 측정하는 자료로 활용된다(Gutman et al., 1997). Landsat 8 영상의 밴드 4(RED)와 밴드 5(NIR)를 이용해 산출하며, 밴드 4는 엽록소 흡수량을 측정하여 식물종을 구분하고, 밴드5는 식생 유형과 수목의 경계를 식별하고 토양을 구분한다. NDVI 값을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$\text{In Landsat 4-7,} \\ \text{NDVI} = (\text{Band 4} - \text{Band 3}) / (\text{Band 4} + \text{Band 3}) \quad (4)$$

$$\text{In Landsat 8-9,} \\ \text{NDVI} = (\text{Band 5} - \text{Band 4}) / (\text{Band 5} + \text{Band 4}) \quad (5)$$

Landsat 4-7에서 밴드 4는 근적외선(Near-Infrared, NIR)이며 밴드 3은 적색파장(Red)이다. Landsat 8-9에서는 밴드 5가 NIR의 역할을 하며 밴드 4가 적색파장 영역이다.

4. LST와 NDVI 관계분석

LST의 변화 추이에 따라 NDVI가 어떠한 관계를 갖고 변화하는지 알아본다. 지표면온도와 NDVI의 상관관계를 분석한 대부분의 연구에서는 NDVI와 지표면온도는 음의 상관성을 가지고 있음을 나타냈다(EO et al., 2021).

파주시의 경우 개발의 속도와 인구 증가의 속도는 해를 거듭할수록 가파르게 증가하여 녹지비율이 감소해갈 것으로 예상된다. 따라서 파주시의 LST 변화는 기후변화로 인한 고온현상에 의한 변화로 볼 수 있으나 LST의 증가는 녹지율의 감소와 유의미한 관계에 있으므로 두 요인의 변화의 연관성을 밝히는 것은 도시환경 개선 측면에서 중요하다. 앞서 진행된 과정으로부터 계산된 해당 지역의 LST와 NDVI는 래스터 데이터 형식으로 구성되어 있다. 래스터 데이터는 Fig 5와 같이 픽셀에 값이 부여되어 있는 상태로 제공된다. 따라서 사용자는 이를 적절한 도구를 통해 필요한 정보를 추출해야 한다. 본 연구에서 목적으로 하는 LST와 NDVI 값은 위성영상의 픽셀에 입력되어 있다. 따라서 이를 수치화하기 위하여 비교하기 위해 오픈소스 GIS 소프트웨어 'QGIS'의 래스터계산기 및 래스터 레이어 통계 기능을 활용하였다. 이를 사용하여 NDVI 수치 계산을 진행하였고 LST와 NDVI의 통계량을 산출하였다.

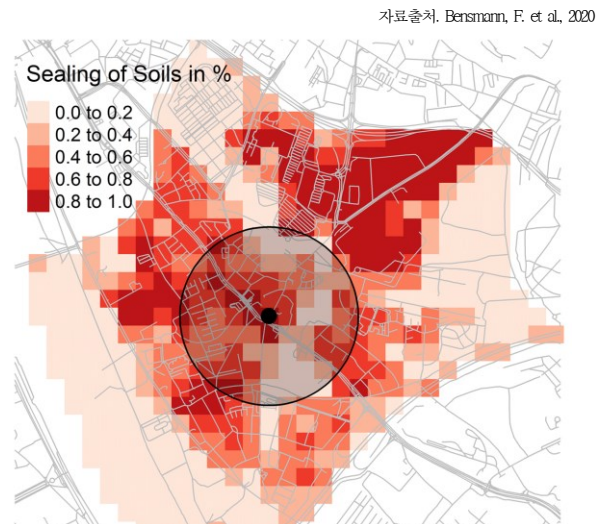


Fig 5. 래스터 데이터 예시

III. 결과 및 논의

1. LST 추출

운량이 높은 2006년 영상을 제외한 2000년~2020년의 위성영상을 이용하였다. 총 20개의 영상 중 기상조건이 유사한 10장의 영상을 최종 선정 후 GEE를 활용하여

LST를 추출하였다. 해당 방식을 파주시와 서울경기 지역에 일괄 적용하여 LST를 산출하였다. 이 방식으로

산출된 파주시의 LST 래스터 영상은 Fig 6(a), Fig 6(b)와 같다.

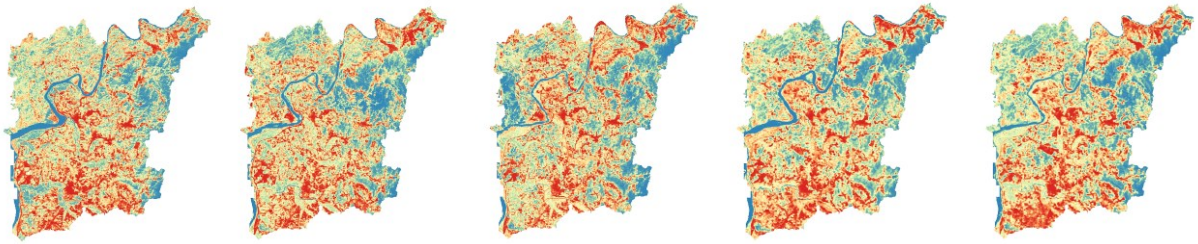


Fig 6 (a). 과거 5개년 파주 LST (좌측부터 2000년, 2001년, 2002년, 2004년, 2009년)

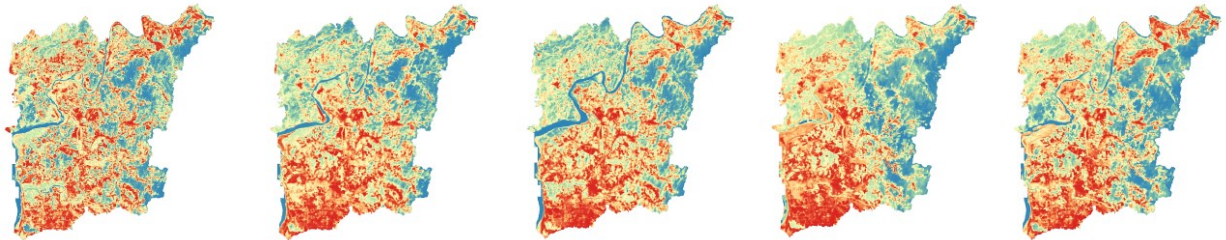


Fig 6 (b). 최근 5개년 파주 LST (좌측부터 2015년, 2016년, 2017년, 2019년, 2020년)

2. NDVI 추출

과거 5개년 (2000년, 2001년, 2002년, 2004년, 2009년)과 최근 5개년 (2015년, 2016년, 2017년, 2019년, 2020년)의 위성영상을 미국 지질조사국(USGS)의 Earth Explore에서 제공하고 있는 위성영상을 제공받았다. 지표면 온도 추출에 이용한 GEE가 해당 기관의 위성영상과 동일한 영상을 이용하고 있으므로 LST 산출 시 이용한 일자와 같은 위성영상을 제공받았다. NDVI는 촬영된 Landsat

위성의 시리즈에 따라 계산 방식이 상이하므로 각 일자를 촬영한 Landsat 위성을 확인 후 해당 NDVI 계산 방식을 이용하였다. 이후 계산에 필요한 파장영역이 포함된 BAND를 제공받았다. 제공받은 위성의 BAND는 QGIS의 래스터 계산기 기능을 통해 산출하였다. 해당 방식을 파주시와 서울경기 지역에 일괄 적용하였다. 산출된 파주시의 NDVI 래스터 영상은 Fig 7(a), Fig 7(b)와 같다.

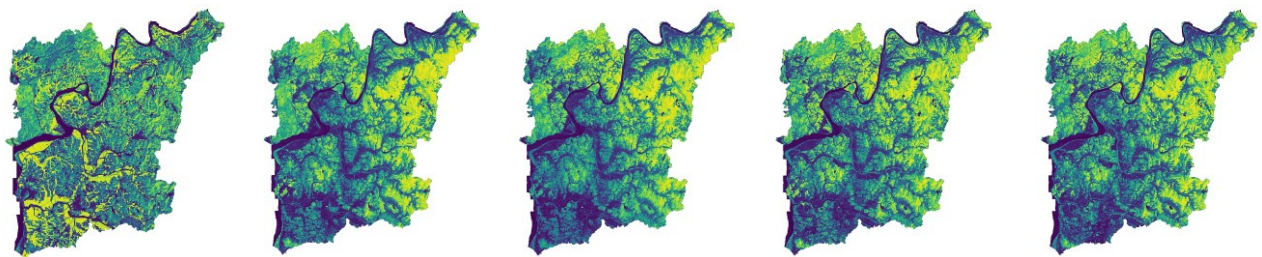


Fig 7 (a) . 과거 5개년 파주 NDVI (좌측부터 2000년, 2001년, 2002년, 2004년, 2009년)

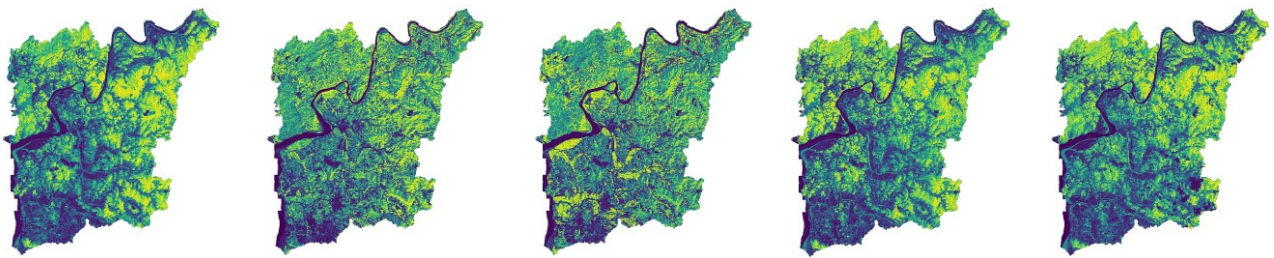


Fig 7 (b) . 최근 5개년 파주 NDVI (좌측부터 2015년, 2016년, 2017년, 2019년, 2020년)

3. LST와 NDVI 연관성 비교

LST와 NDVI의 연관성을 파악하기 위하여 서울시와 서울경기 영상을 이용하였다. 산출된 데이터는 Table 3, 4와 같다. 파주시의 경우 과거 5개년에서 NDVI 평균이 0.27로 산출되었으며 LST는 30.36℃이었다. 같은 시기 서울경기 전체 NDVI 평균은 파주시 평균보다 0.08가량 낮은 0.19였으며 LST는 파주시보다 낮은 29.48℃로 나타났다.

최근 5개년의 경우, 파주시의 NDVI는 0.29로 과거 5개년에 비해 0.02 증가하였다. LST는 28.61℃로 1.75℃ 감소한 것을 알 수 있다. 서울경기의 경우 NDVI는 0.19로 과거 5개년 서울경기의 평균값과 동일하였으며 LST는 28.54℃로 과거 평균값 대비 0.94℃ 감소하였다. 파주시의 경우에는 NDVI 수치가 과거에 비해 최근에 소폭 개선되었음을 데이터를 통해 알 수 있다. NDVI가 상승함에 따라 LST는 감소하는 관계를 알 수 있다. 서울경기의 경우 NDVI 값에서는 큰 변화를 보이지 않았으나 LST 값에서 소폭의 변화를 보였다. NDVI가 상승한 파주시의 경우와

비교해보면 NDVI가 크게 상승하면 LST는 큰 폭으로 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 변화의 양상은 아래 Fig 8 (a), (b), Fig 9 (a), (b)을 통해 나타냈다. 대부분의 경우에서 LST와 NDVI는 음의 상관관계를 갖는 모습을 보였다. 하지만 2000년 9월 4일의 경우를 보면 서로 음의 상관관계로 보기 어려운 양상을 보인다. 이는 전 지구적인 기후의 양상에 영향을 받고 있다고 할 수 있다. 기상청 자료에 의하면 1998년/2000년은 라니냐가 기승을 부렸던 시기이다(기상청, 2000). 라니냐가 발생하면 서태평양에 위치한 우리나라는 여름철에 이상고온 현상을 보인다. 따라서 NDVI와 LST의 상관성보다 강력한 고온의 영향이 해당 관계를 유발하였을 것으로 예상된다. 이러한 양상은 파주시와 서울경기의 경우에 동일한 모습을 보였다. 이를 제외한 대부분의 경우, NDVI가 상승하면 LST는 감소하는 방향으로 진행되며 NDVI가 감소하면 LST는 증가하는 방향으로 진행되는 것을 확인하였다.

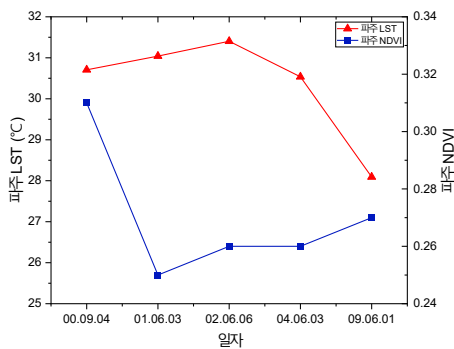


Fig 8 (a) . 과거 5개년 파주 LST와 NDVI 관계

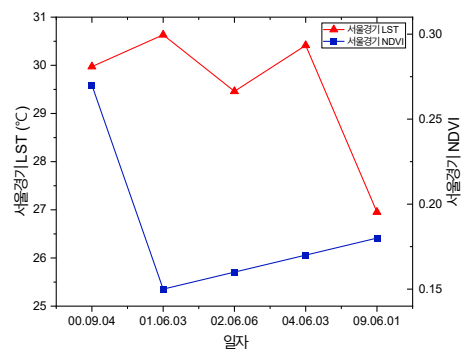


Fig 8 (b) . 과거 5개년 서울경기 LST와 NDVI 관계

Table 3 . 과거 5개년 파주시 및 서울경기 지역 LST 및 NDVI

일자	파주시 LST (°C)	서울경기 LST (°C)	파주시 NDVI	서울경기 NDVI
2000년 9월 4일	30.71	29.97	0.31	0.27
2001년 6월 3일	31.04	30.63	0.25	0.15
2002년 6월 6일	31.40	29.46	0.26	0.16
2004년 6월 3일	30.54	30.41	0.26	0.17
2009년 6월 1일	28.09	26.95	0.27	0.18
평균	30.36	29.48	0.27	0.19

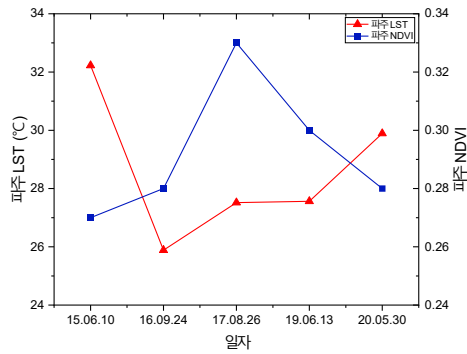


Fig 9 (a) . 최근 5개년 파주 LST와 NDVI 관계

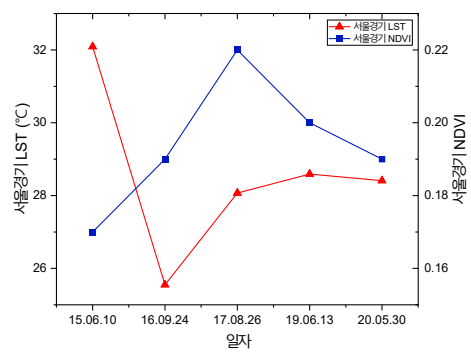


Fig 9 (b) . 최근 5개년 서울경기 LST와 NDVI 관계

Table 4 . 최근 5개년 파주시 및 서울경기 지역 LST 및 NDVI

일자	파주시 LST (°C)	서울경기 LST (°C)	파주시 NDVI	서울경기 NDVI
2015년 6월 10일	32.23	32.09	0.27	0.17
2016년 9월 24일	25.88	25.55	0.28	0.19
2017년 8월 26일	27.52	28.07	0.33	0.22
2019년 6월 13일	27.56	28.59	0.30	0.20
2020년 5월 30일	29.89	28.41	0.28	0.19
평균	28.61	28.54	0.29	0.19

4. 논의

최근 파주시의 LST가 과거 파주시의 LST보다 낮게 도출되었다. 파주시의 개발은 1990년대 중후반부터 본격적으로 시작되었다. 해당 시기에 많은 지역이 기존 산지 및 농지를 토지 개발하기 위해 수목을 정리하여 비열이 낮은 토양만 존재하는 개활지 상태로 존재하였다. 이 시기가 2기 신도시 개발 등 대규모 도시개발 시기와 겹쳐 NDVI는 감소하고 이에 따른 LST는 상승한 것으로 판단한다. 최근 5개년은 주택단지 개발 및 조정, 가로수 식재 등으로 과거에 비해 NDVI 상승이 된 것으로 예상된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 파주시의 도시열섬 현상을 알아보고자 NDVI와 LST와의 관계를 파악하고자 하였다. 따라서 2000년부터 2020년 사이에 촬영된 총 20장의 Landsat 위성영상 중 기상조건이 가장 유사한 10장의 사진을 선별하였다. 이를 과거 5개년과 최근 5개년을 각각 5장씩 구분하여 분석을 진행하였다. 선정된 위성영상의 NDVI는 QGIS 래스터 계산기를 활용하여 수치를 산출하였다. LST는 GGE 온라인 플랫폼에서 제공된 코드를 통해 산출하였다. 또한 파주시에서의 경향이 단순히 파주시에 국한된 경우일 가능성이 있어 비교군으로

서울경기 지역의 NDVI와 LST 또한 동일한 방법으로 수치를 산출하였다. 두 인자의 경향을 그래프로 나타냈다. 그 결과, NDVI와 LST는 음의 상관관계 즉, 반비례 관계에 놓여있는 것을 확인하였다. 그리고 최근 5개년의 NDVI가 과거 5개년의 경우보다 평균 0.02 상승하였고 이에 따른 LST는 1.75°C 감소하였다. 파주시와 서울경기의 추세가 동일한 양상을 보이는 것을 확인하였다. 추가적으로 파주시는 과거 5개년보다 최근 5개년 경우에 있어 NDVI가 일정 부분 개선된 것을 확인하였고 이에 따른 LST가 감소한 것을 알 수 있었다.

본 연구는 개발이 급속도로 진행되고 인구가 빠른 속도로 유입이 되는 파주시의 도시열섬 현상을 우려함에 따라 진행되었다. 새롭게 알게 된 점은 도시화가 진행됨에 따라 무조건적으로 LST가 증가하는 것은 아니라는 것이다. 오히려 도시화가 진행되는 공사과정이 NDVI를 감소시키며 이에 따라 LST가 증가할 가능성이 있다는 것을 밝혀냈다. 하지만 해당 년도의 특정 일자를 바탕으로 진행된 연구라는 점에서 한계가 있다. 2000년부터 2020년의 모든 일자에 걸친 분석이 진행될 경우 보다 정확한 NDVI와 LST의 추세와 연관성을 파악할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 도시화가 진행되는 과정과 도시화가 완료된 시기에 해당하는 세부적인 관련 연구가 필요하다. 도시 열섬현상은 도시민의 온열 질환 발병과 에너지 사용 문제로 인한 연료 및 탄소 증가문제가 우려된다.

이러한 순환은 지속적으로 가속화될 가능성이 높으며 순환의 고리를 끊는 것이 지속가능한 도시로 나아가기 위해 필수적이다. 따라서 도시개발이 진행될 시점부터 도시열섬 현상 등 도시환경을 고려한 개발 방식이 필요하며 관련 연구가 활발히 진행될 필요가 있다. 마지막으로, 도시 열섬현상을 완화할 수 있는 다수의 연구를 바탕으로 해당 현상이 심한 지역을 우선적으로 완화하는 적극적인 행정 노력이 필요하다.

참고문헌

1. 김경훈, 김형수, 권용하, 박인선, 정운재. (2022). 도시열섬 완화를 위한 나무심기운동에 따른 지표면 온도 변화 분석 - 구미시를 사례로 -. 한국지리정보학회지, 25(1), 16-27.
2. 박민호, 2001, Landsat TM 열적외 테이터를 이 용한 도시 열섬현상에 관한 연구-서울시를 대상으로-, 대한토목학회논문집, 21(6-D), 861-874.
3. Joon-Bum Jee, Tae-Heon Kwon, Jung-Hoon Chae, Jong-Sook Park. (2013). 고해상도 위성관측(Landsat, MODIS) 자료를 이용한 수도권 지표온도 분석. 한국기상학회 학술대회 논문집, 0, 520-521.
4. 이경일, 임철희. (2022). Landsat영상을 이용한 토지피복 변화에 따른 행정중심복합도시의 표면 열섬현상 변화분석. 대한원격탐사학회지, 38(3), 225-236.
5. 도후조, 이정민, 나정화. (2007). 도시 지표면 온도분포 특성 및 열섬완화방안. 한국환경과학회지, 16(5), 611-622.
6. 안미연, 홍석환. (2018). 산림 우점식생 변화가 온도에 미치는 영향. 한국환경생태학회지, 32(1), 97-104.
7. Quan HC, Lee BG. 2009. Analysis of Relationship Between LST and NDVI using Landsat TM Images on the City Areas of Jeju Island (in Korean with English abstract). Journal of Korean Society for Geospatial Information Science. 17(4):39-44.
8. 백선욱, 김동현, 김형수, 구분엽, 정운재. (2022). 시계열 Landsat 위성영상을 활용한 도시 열섬 현상 완화 방안에 관한 연구 - 청라 국제도시를 중심으로 -. 한국지리정보학회지, 25(3), 1-16.
9. 윤희천, 김민규, 정갑용.(2013).도시열섬 완화를 위한 녹지 증가에 따른 온도변화 분석.한국측량학회지,31(2),143-150.
10. 홍선욱.(2021).서울 수도권 지역의 토지 피복 변화가 여름철 도시열섬 강도와 체감온도에 미치는 영향.대기,31(2),143-156.
11. 김동현, 송슬기.(2016).도시 고온현상에서의 토지피복 유형과 체감온도 간 관계분석.국토계획,51(1),137-152.
12. 김영표. (2004). LANDSAT TM 위성영상을 이용한 임상별 온도분포연구. 한국산림휴양학회지, 8(3), 11-17.
13. 신수현, 국민정, 이규성. (2004). 한반도의 다중시기 NDVI 를 이용한 가뭄지수 적용성 분석. 대한공간정보학회 학술대회, 203-208.
14. Bensmann, F., Heling, L., Jünger, S., Mucha, L., Acosta, M., Goebel, J., ... Zapilko, B. (2020). An Infrastructure for Spatial Linking of Survey Data. Data Science Journal, 19(1), 27. DOI: <http://doi.org/10.5334/dsj-2020-027>
15. 기상청. (2000). 라니냐 현황 및 전망