

Research Article

신도시 개발에 따른 표면 열섬현상 변화분석 및 도시 형태와의 상관관계

이경일 *

Analysis of the Surface Urban Heat Island Changes according to New Towns Development and Correlation with Urban Morphology

Kyungil Lee *

Abstract: Land cover change due to urban population concentration and urban expansion can cause various environmental problems such as urban heat islands. In particular, New towns are considered an appropriate study site to analyze changes in urban climate due to rapid urbanization in a short period. This study used Landsat satellite imagery to compare and analyze the land cover changes before and after the development of two new towns with different plans, and the resulting changes in surface urban heat island (SUHI) phenomena. Correlation analysis was also conducted between urban structural features that may affect the SUHI intensity. The results of the analysis confirm the rapid change in land cover as new town development progresses and the direct intensification of the SUHI phenomenon. This study confirms the differences in SUHI caused by different urban plans and suggests the need for three-dimensional urban planning to improve the thermal environment.

Keywords: Urbanization, Urban planning, Remote sensing, Surface urban heat island, Urban climate change

요약: 도시 인구집중 및 도시확장에 의한 토지피복 변화는 도시 내 열섬현상과 같은 다양한 환경문제를 유발할 수 있다. 특히 계획적으로 구축되는 신도시의 경우 짧은 기간에 진행되는 급격한 도시화로 인한 도시 기후의 변화를 분석하기에 적절한 연구대상지로 여겨진다. 본 연구에서는 Landsat 위성영상을 활용하여 분당 및 판교 신도시를 대상으로 개발 전후 토지피복 변화와 이에 따른 표면 도시열섬(surface urban heat island, SUHI) 현상의 변화를 비교, 분석하였다. 또한 SUHI 강도에 영향을 끼칠 수 있는 도시구조적 특징들 간 상관분석을 수행하였다. 분석 결과, 신도시 개발이 진행됨에 따른 토지피복의 급격한 변화 및 이에 따른 SUHI 현상의 직접적인 심화를 확인하였다. 본 연구를 통해 각기 다른 도시계획에 의한 SUHI 현상의 차이를 확인하고 열 환경 개선을 위한 입체적인 도시계획의 필요성이 제시될 수 있다.

주요어: 도시화, 도시계획, 원격 탐사, 표면 도시열섬, 도시기후변화

Received September 30, 2023; Revised October 6, 2023; Accepted October 7, 2023; Published online October 31, 2023

¹⁾ 서울과학기술대학교 시반도체연구소 연구교수(Research Professor, AI Semiconductor Research Center, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea)

* Corresponding author: Kyungil Lee (leedake@seoultech.ac.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

전 세계적인 도시지역으로의 인구집중 및 이에 따른 도시확장은 각기 다른 규모의 행정구역 내 토지이용과 토지피복의 변화를 촉진하는 주요 원인으로 작용한다. 대한민국의 경우 1990년대부터 도시지역 내 인구 비율이 75%를 초과하였으며, 2000년대 이후 92%까지 증가하여 큰 변화 없이 유지되고 있는 실정이다(Lee and Lim, 2022; Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Korea Land and Housing Cooperation, 2021). 이러한 도시지역 내 급격한 인구증가는 자연지역으로 활용되고 있던 토지를 인구와 산업을 위한 시가지로 변화하게 만들고 이 과정에서 콘크리트, 아스팔트 및 다양한 건축물 등 열 흡수표면이 증가하며 국지적인 표면온도(land surface temperature, LST)의 증가를 발생시킨다(Lee et al., 2020). 전 세계적으로 관찰되고 연구되고 있는 표면 도시열섬(surface urban heat island, SUHI) 현상은 교외지역에 비해 높아진 시가지역 내 현열과 저장열 플럭스, 건축물로 인한 표면 거칠기의 증가로 촉진된 난기류 등 다양한 원인으로 유발되고 시가지 특성에 따라 그 정도는 달라질 수 있다(Clinton and Gong, 2013; Oke et al., 2017). 즉 SUHI의 크기와 범위는 시가지 내 집단적인 건축물의 형태, 특성 및 배치 등에 따라 달라질 수 있으며 이는 도시의 공간구조 및 발전방향을 결정하는 도시계획이 SUHI 현상에 중요한 영향을 끼칠 수 있음을 의미한다(Tran et al., 2017).

이에 따라 토피지복 및 SUHI 현상의 관계에 대한 많은 연구가 수행되고 있으며, 균일하지 못한 실측 온도 자료보다는 연구대상지의 전체적인 LST를 확인할 수 있는 위성영상이 주로 활용되고 있는 실정이다(Cho et al., 2019; Clinton and Gong 2013; Kim et al., 2021; Miles and Esau, 2017; Rendana et al., 2023; Saha et al., 2020; Tran et al., 2017). 국내를 대상으로 한 연구들은 주로 기존 대도시들을 대상으로 수행되었는데, 이는 국토 면적의 약 12.6% 정도인 수도권 지역과 일부 광역시에 도시기능 및 인구가 과도하게 집중된 대한민국 도시화의 특징에 의한 것으로 판단된다(Cho et al., 2019; Kim et al., 2021; Lee and Lim, 2022). 이러한 기존 연구들은 도시화에 의하여 도심지와 교외지역 간 직접적인 LST 차이에 따른 SUHI 현상의 변화를 보여주었다는 점에서 의의가 있

으나, 도시계획에 따른 SUHI 현상의 변화 및 영향을 확인하는 데는 한계가 나타났다. 또한 기존 연구들의 경우 SUHI 현상을 분석하기 위한 도구로써 토지피복 자료만을 주로 활용하였기 때문에 도시 내 건축물들의 구조적 특징 및 이에 따른 SUHI 강도의 차이가 제시되지 않았다.

신도시는 기존 대도시의 인구집중 문제와 주택가격 인플레이션에 대응하기 위한 정책으로 계획적으로 결정된 경계 내에서 상대적으로 짧은 기간에 건설된 도시로서 20세기 중반 이후 전 세계적으로 건설되어 왔다(Wakeman, 2016). 대한민국의 경우 현재 1, 2기 신도시 계획에 기반하여 15개의 신도시가 구축되었고, 2018년 9월 3기 신도시 개발이 발표 및 계획된 상태이며 기수가 높아질수록 친환경적인 도시계획을 기반으로 지속 가능한 신도시 건설을 목표로 한다(Kim and Lee, 2020). 이러한 신도시는 계획에 기반한 급속도의 개발에 따른 토지피복 및 도시기후 변화의 비교분석 연구를 수행하기 적절한 대상지로서, SUHI 현상과 같은 문제를 해결하기 위한 전략을 고안할 수 있는 기회를 제공할 수 있다(Qaid et al., 2016). 기존 연구들이 대부분 기성도시를 대상으로 수행된 만큼 신도시를 대상으로 한 열환경 분석연구는 상대적으로 드물다.

본 연구에서는 Landsat 영상을 기반으로 대한민국 1, 2기 신도시에 각각 해당되는 분당 및 판교 신도시를 대상으로 개발이 진행됨에 따른 토지피복 및 SUHI 현상의 변화를 비교 분석하였다. 또한 구축된 SUHI 분포 지도 및 건물의 수평 및 수직 구조를 확인할 수 있는 건축물 통계자료를 활용하여 SUHI 강도에 영향을 미칠 수 있는 구조적 특성을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해 기존 도시와 추후 구축될 도시의 열섬현상 완화를 위한 정책 제언 및 의사결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 대상지 및 자료

2.1. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 분당 및 판교 신도시이다(Fig. 1). 두 신도시 모두 주택난 및 부동산 가격 등 주거문제 해결을 위하여 조성되었으나, 1기 신도시의 경우 계획되

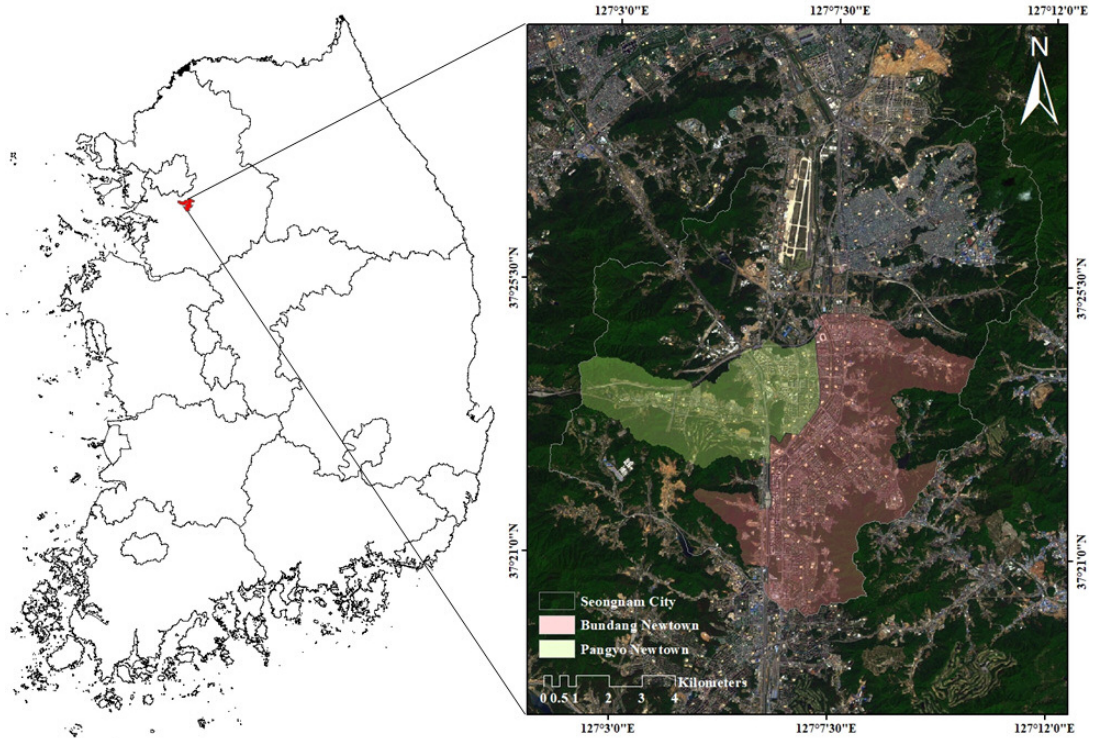


Fig. 1. Study area.

Table 1. Urban planning for each new town

Division (unit)	Bundang new town	Pangyo new town
Generation of the new town	1st generation	2nd generation
Development period	'89-'96	'03-'17
Development area (km ²)	19.64	8.9
Number of total households (thousands)	97.6	29.3
Population density (number/ha)	199	98
Average greenspace ratio (%)	12-25	25-35
Average floor space ratio (%)	184	161
Transportation infrastructure	Vehicle-oriented	Public transportation-oriented

지 않은 도시 확장과 높은 개발밀도에 따른 자연 환경 훼손, 주택 단지 내 낮은 녹지 비율 등이 특징이다. 반면 2기 신도시는 1기 신도시에 비해 상대적으로 낮은 개발 밀도, 공원 및 녹지면적 증진에 따른 친환경적 도시계획을 기반으로 조성되었으나 신도시별로 차이는 존재하며, 이중 분당 및 판교 신도시의 계획은 다음과 같다 (Table 1) (<http://www.molit.go.kr/>). 두 신도시 모두 성남시 내 존재하고 인접해 있더라도 각기 다른 도시계획에 의해 구축된 만큼 SUHI 현상의 확산과 증가 정도 역시 각 도시별로 차이가 있을 것으로 예상된다.

2.2. 연구 자료

본 연구에 사용한 자료는 크게 위성영상과 상관성 분석을 위한 건축물 통계자료로 구성되어 있다. 위성영상은 United States Geological Survey에서 제공하는 Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat-8 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) 영상을 활용하여 토지피복 분류, 분광지수 및 지표면온도를 산출하였다. 영상 취득시기는 분당 및 판교 신도시의 도시계획에 따른 개발 전, 후 상태를 시계열적으로 확인할

Table 2. Used Landsat images

Study period	Sensor	Acquisition date	Resolution	Cloud cover	Path / Row
1989	Landsat 5 TM	18 May 1989	30 m	0.00%	115 / 34
2000	Landsat 5 TM	07 May 2000	30 m	0.00%	116 / 34
2018	Landsat 8 OLI	09 May 2018	30 m	1.22%	116 / 34

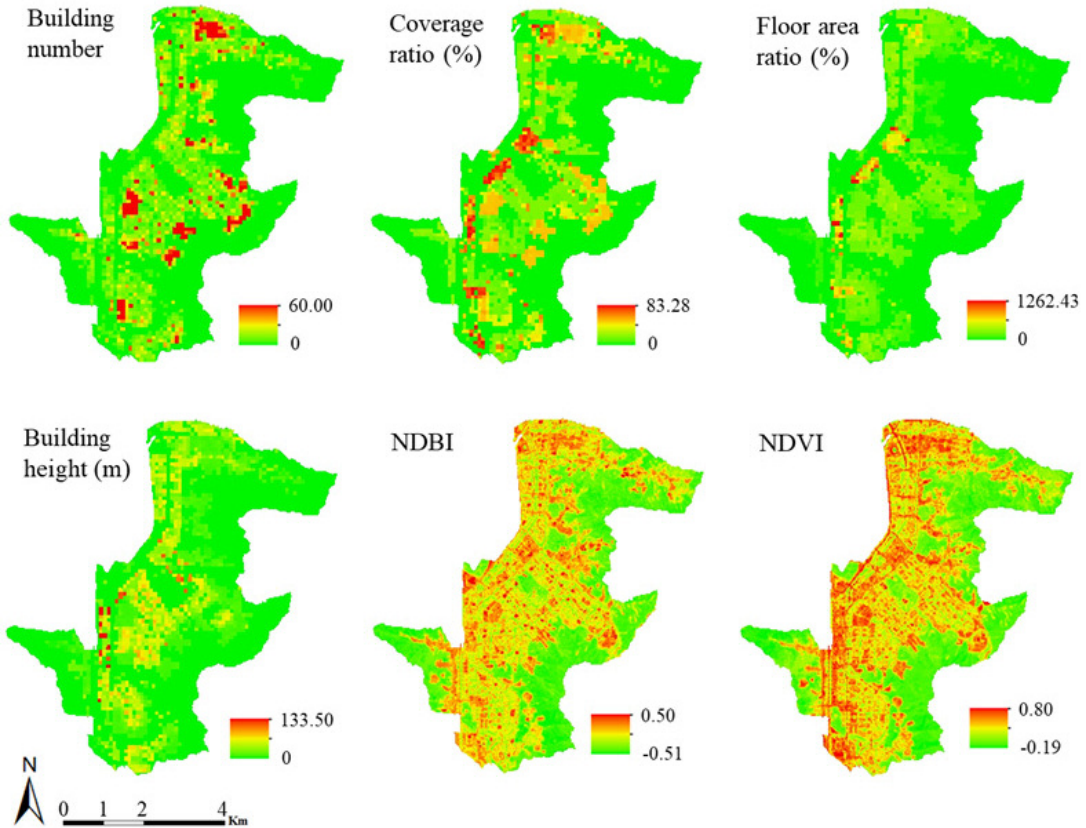


Fig. 2. Maps of indices of the building structure in 2018 in Bundang new town.

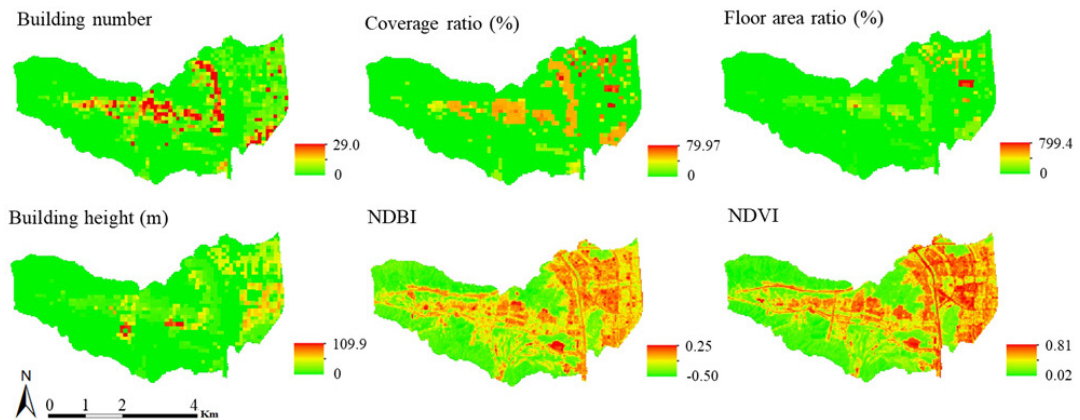


Fig. 3. Maps of indices of building structure in 2018 in Pangyo new town.

수 있는 1989년, 2015년, 2018년도이며 전반적으로 윤량이 적고 영상 품질이 높은 5월 영상을 활용하여 연구를 수행하였다(Table 2). 이 때 Landsat 8 TIRS 센서를 통해 구축된 열 적외선 밴드인 Band 10 (10.60–11.19 μm), Band 11 (11.50–12.51 μm) 중 대기의 영향이 상대적으로 적은 Band 10에서 산출된 온도를 활용하였다(Kim et al., 2018).

도시의 수평 및 수직적 형태와 SUHI 강도와의 상관성 분석을 위한 건축물 통계자료의 경우 국토교통부 국토정보플랫폼에서 제공하는 2018년도 5월 건폐율, 용적률, 건물높이 및 건축물 수 자료를 활용하였다(Figs. 2 and 3). 건폐율이란 한 대지에 있는 모든 건물과 구조물의 총 면적을 대지 자체의 면적으로 나눈 비율이고, 용적률은 건물 외벽의 외부 면을 기준으로 측정된 건물 각 층의 총 수평 면적의 합계를 의미한다. 본 자료에서 건폐율, 용적률, 건물 높이는 각 10,000 m^2 격자 내의 평균 값으로 나타나고 건축물 수의 경우 10,000 m^2 격자 내 건축물 수의 총합으로 해당 지역의 건물 밀도를 나타낼 수 있다.

3. 연구 방법

3.1. 전 처리 및 지표면온도 계산

Landsat 영상 활용 전 본 연구에서는 QGIS 3.22 소프트웨어를 활용하여 dark object subtraction 방식을 활용한 대기보정 및 방사보정을 수행하였다(Voogt and Oke, 2003). 보정 후 Band 10의 digital number을 반사도 값으로 변환시키기 위해 National Aeronautics and Space Administration에서 제공하는 users handbook 식(1)을 활용하였다(Zanter, 2019). 이때 L_λ 은 spectral radiance ($\text{W}/(\text{m}^2 * \text{sr} * \mu\text{m})$), M_L 은 radiance multiplicative scaling factor for the band from the metadata, A_L 은 radiance additive scaling factor for the band from the metadata, D_N 은 original pixel value를 의미한다.

$$L_\lambda = M_L \times D_N + A_L \quad (1)$$

산출한 분광 복사량을 바탕으로 식(2)를 통해 밝기 온도(T_B)를 계산하였다. 이때 분광방사휘도와 절대온도 보정계수인 K_1 과 K_2 는 Band 10에 해당되는 값($K_1: 774.89$, $K_2: 1321.08$)을 대입하여 계산하였다.

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

마지막으로 Sobrino et al. (2004)이 제안한 방식을 활용하여 식(3-6)을 통해 지표면 방사율을 계산하고 밝기 온도를 LST로 변환하였다(Table 3). 이 때 $\epsilon_{\lambda v}$ 는 식생의 방사율($\approx 0.9863 \mu\text{m}$)이고 $\epsilon_{\lambda s}$ 은 토양의 방사율($\approx 0.9668 \mu\text{m}$)이다(Yu et al., 2014). 본 연구에서는 표면 거칠기(C_λ) 값으로 0.005를 활용하였고, ρR 은 Red band의 반사값을 의미한다(Sekertekin and Bonafoni, 2020).

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

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S}\right)^2 \quad (4)$$

$$\epsilon_\lambda = \epsilon_{\lambda v} P_v + \epsilon_{\lambda s} (1 - P_v) + C_\lambda \quad (5)$$

$$LST = \frac{T_B}{\left(1 + \left(\frac{\lambda \times T_B}{L_\lambda}\right) \times \ln \epsilon\right)} \quad (6)$$

Table 3. Normalized difference vegetation index (NDVI) ranges and corresponding formula for calculating emissivity

NDVI range	Emissivity
$NDVI < NDVI_S$	$0.979 - 0.046 \rho R$
$NDVI_S \leq NDVI \leq NDVI_V$	$\epsilon_\lambda = \epsilon_{\lambda v} P_v + \epsilon_{\lambda s} (1 - P_v) + C_\lambda$
$NDVI > NDVI_V$	0.99

3.2. 토지피복 분류

본 연구에서는 QGIS 3.22 semi-automatic classification 플러그인을 활용한 최대우도법 알고리즘을 지도분류 기법을 통해 토지피복 지도를 구축하였다. 최대우도법 알고리즘은 클래스별로 입력 및 학습된 확률분포함수를 기반으로 예측과정에서 클래스 값을 과대평가하지 않기 때문에 분류 정확도가 높은 특징이 있다(Sun et al., 2013). 이러한 장점으로 영상 내 픽셀의 공간적 밀집도가 높은 도시지역의 토지피복 분류를 위해 기존 연구들에서도 활용되고 있다(Saha et al., 2020; Sun et al., 2013). 최대우도법 알고리즘을 활용하여 본 연구에서는 각 시기별 토지피복을 (i) 시가지, (ii) 산림, (iii) 초지, (iv) 나지, (v) 농업지역, (vi) 습지를 포함한 수역에 해당하는 6개 항목으로 분류하였다. 또한 분류된 토지피복 지도의 정확도 분석은 면적이 거의 없는 수역을 제외한 5개 클래스

스별로 50개 샘플을 추출하여 항공영상 및 고해상도 구글어스지도를 활용하여 계산된 overall accuracy (OA), user's accuracy (UA), producer's accuracy (PA), kappa-coefficient를 기반으로 수행하였다.

3.3. SUHI Intensity 계산 및 상관분석

본 연구에서는 SUHI intensity 계산을 위해 각 시기 및 신도시별로 LST 및 토지피복 지도를 활용하여 도시지역 내 분포하고 있는 LST와 시가지 토지피복을 제외한 토지피복의 온도 차이로 정의하였다(식 7). 여기서 T_s 는 신도시의 LST (°C) 분포, T_{mean} 과 δ 는 신도시 내 시가지의 토지피복의 평균 LST와 표준편차이다. 이를 통해 일시적인 LST 값이 아닌 도시 확장에 따른 실제 SUHI 효과를 확인할 수 있다. 이 때 수역은 LST를 불규칙적으로 변화시킬 수 있기 때문에 계산에서 제외하였다.

$$\text{SUHI intensity distribution} = T_s - (T_{\text{mean}} + 0.5 \times \delta)_{\text{surrounding area}} \quad (7)$$

구축된 SUHI 분포의 신뢰성과 실제 건축물 현황과의 관계를 확인하기 위한 피어슨(Pearson) 상관분석을 수행하였다. 피어슨 상관계수는 일반적으로 두 변수 간의 선형 회귀 분석에 사용되며, 두 변수의 공분산을 표준편차의 곱으로 나눈 값으로 -1에서 1 사이의 값을 나타낸다. 이때 -1은 완전한 음의 상관관계, 1은 완전한 양의 상관관계를 나타내고 0은 상관관계가 없음을 의미한다.

상관분석을 위해 판교신도시까지 조성이 완료된 2018년 5월 기준 SUHI 분포지도와 건축물 통계자료를 활용하였고, 시가지를 대상으로 무작위 샘플링을 통한 100개의 포인트를 구축하고 값을 추출하였다. 또한 LST 및 토지피복과 관련된 지표로서 NDVI와 normalized difference built-up index (NDBI)를 추가적으로 활용 및 추출하였다. NDVI는 지역 내 식생수준 확인을 위한 대

표적 지표이고, NDBI는 시가지의 특성을 확인하기 위한 대표적 지표로 활용된다(Guha et al., 2018) (식 8).

$$NDVI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (8)$$

4. 결과 및 고찰

4.1. 신도시 개발에 따른 토지피복 변화

각 시기별로 분류된 토지피복 지도의 정확도 평가에 따라서 도출된 OA와 kappa-coefficient 값은 Table 4를 통해 제시되었으며, kappa-coefficient 값의 해석은 다음과 같다(Viera and Garrett, 2005): $\kappa \leq 0$ = 우연보다 적은 일치, $0 < \kappa \leq 0.2$ = 약간의 일치, $0.2 < \kappa \leq 0.4$ = 공정한 일치, $0.4 < \kappa \leq 0.6$ = 보통의 일치, $0.6 < \kappa \leq 0.8$ = 상당한 일치, $0.8 < \kappa \leq 1$ = 거의 완벽한 일치. 분석 결과 모든 시기의 토지피복 지도에 대한 OA와 kappa-coefficient 값이 0.8을 넘어 분류 결과가 유의미함을 나타냈다.

변화 양상을 살펴보면 두 신도시 모두 계획 및 조성 이후 시가지지역은 급격히 확장되었고 산림과 농업 지역은 급격히 감소되었음을 확인할 수 있다(Figs. 4a and 5a) (Table 5). 1989년도의 경우 두 신도시 모두 산림 및 농업 지역(85%)이었으며, 시가지는 5% 미만으로 나타났다. 하지만 분당 신도시가 조성된 2000년도의 경우 시가지가 42.13%까지 증가하였고, 농업지역은 8.93%까지 감소한 것으로 나타났다. 판교 신도시의 경우 조성이 완료된 2018년도에 들어서 시가지 비율이 40.81%까지 증가하였으며, 농업지역은 2% 미만까지 감소한 것으로 나타났다. 이때 분당 신도시의 시가지 비율은 49.16%로 조성이 완료된 이후에도 지속적인 도시확장이 수행된 것을 확인할 수 있었다. 또한 2018년도 기준으로 도시 내 순수 녹지(산림, 초지)의 비율은 분당신도시(48.37%)보다 판교신도시(56.18%)에서 높게 나타났다.

Table 4. NDVI ranges and corresponding formula for calculating emissivity

Year	UA					PA					OA	Kappa
	B.A.	F	G	O.S.	A.A.	B.A.	F	G	O.S.	A.A.		
1989	83.51	96.00	86.60	92.00	82.08	89.01	95.05	82.35	93.88	80.56	88.00	84.99
2000	86.11	87.88	84.38	90.82	83.84	80.17	95.60	83.51	93.68	82.18	86.60	83.24
2018	82.18	96.04	85.71	93.88	80.39	81.37	92.38	84.00	93.88	86.32	87.60	84.50

B.A.: Built-up areas, F: Forest, G: Grass, O.S.: Open space, A.A.: Agricultural areas.

Table 5. The areas of land cover classes in two new towns from 1989 to 2018

Class	Areas of Bundang new town in km ² (%)			Area of Pangyo new town in km ² (%)		
	1989	2000	2018	1989	2000	2018
B.A.	1.47 (4.39)	14.09 (42.13)	16.44 (49.16)	0.57 (3.23)	2.95 (16.73)	7.19 (40.81)
F.	14.78 (44.19)	11.33 (33.88)	11.91 (35.61)	9.42 (53.43)	8.17 (46.38)	7.20 (40.84)
G.	2.96 (8.84)	3.03 (9.05)	4.27 (12.76)	2.03 (11.54)	2.52 (14.30)	2.70 (15.34)
O.S.	0.15 (0.46)	1.90 (5.68)	0.23 (0.68)	0.09 (0.50)	0.65 (3.68)	0.17 (0.95)
A.A.	13.90 (41.55)	2.99 (8.93)	0.57 (1.71)	5.49 (31.15)	3.32 (18.82)	0.34 (1.96)
W.	0.19 (0.57)	0.11 (0.33)	0.03 (0.08)	0.03 (0.15)	0.02 (0.09)	0.02 (0.10)

B.A.: Built-up Areas, F.: Forest, G.: Grass, O.S.: Open Space, A.A.: Agricultural Areas, W.: Water.

4.2. 신도시 개발에 따른 SUHI 강도 변화

급격한 토지피복 변화에 따른 두 신도시의 SUHI의 강도 변화는 다음과 같다(Figs. 4b and 5b). 두 신도시 모두 1989년도에는 도시화에 따른 SUHI 현상이 나타나는 지역이 거의 없는 것을 확인할 수 있고, 산림지역 및 초지에 비해 시기적으로 식생이 적은 농업 지역에서 상대적으로 높은 LST가 측정된 것으로 나타난다. 분당 뉴타운이 조성된 2000년도에는 구축된 시가지지역을 기반으로 SUHI 현상이 나타나는 범위 또한 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 도로, 저층주거단지 및 정자동내 대규모 고층 주상복합시설이 조성되고 있는 지역에서 높은 SUHI 강도가 나타났다. 2018년도의 경우 저층주거단지, 산업단지에서 높은 SUHI 강도가 나타났으며, 고층 주상복합시설이 조성 완료된 정자동의 경우 고층건물들에 의한 일영면적 감소 등으로 2000년에 비해

운이 조성된 2000년도에는 구축된 시가지지역을 기반으로 SUHI 현상이 나타나는 범위 또한 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 도로, 저층주거단지 및 정자동내 대규모 고층 주상복합시설이 조성되고 있는 지역에서 높은 SUHI 강도가 나타났다. 2018년도의 경우 저층주거단지, 산업단지에서 높은 SUHI 강도가 나타났으며, 고층 주상복합시설이 조성 완료된 정자동의 경우 고층건물들에 의한 일영면적 감소 등으로 2000년에 비해

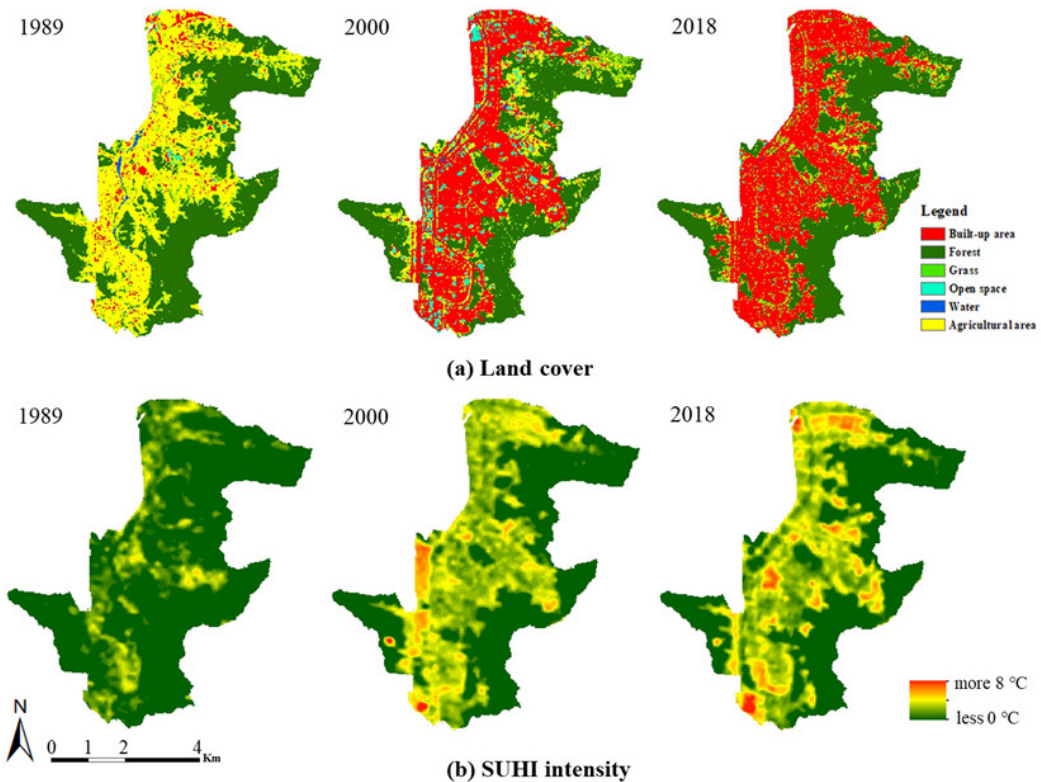


Fig. 4. Land cover and SUHI intensity changes in Bundang new town for the years 1989, 2000, and 2018. (a) Land cover changes in Bundang new town. (b) SUHI intensity changes in Bundang new town.

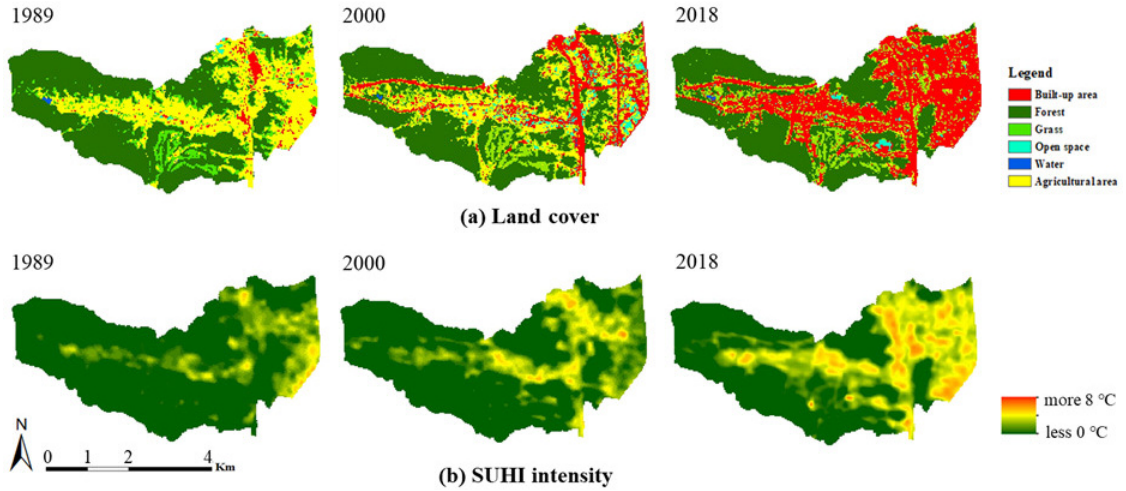


Fig. 5. Land cover and SUHI intensity changes in Pangyo new town for the years 1989, 2000, and 2018. (a) Land cover changes in Pangyo new town. (b) SUHI intensity changes in Pangyo new town.

낮은 SUHI 강도가 나타났다. 판교신도시의 경우 신도시가 조성되기 이전인 2000년도까지는 도로가 조성된 지역 위주로 SUHI 현상이 나타났으나, 신도시 조성 이후 그 면적이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 분당 신도시와 마찬가지로 아파트 단지보다는 저층주거 단지가 조성된 지역에서 더 높은 SUHI 강도가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4.3. SUHI 강도와 도시 형태 간의 상관관계

건물은 도시지역 내 에너지 소비의 40% 이상을 담당하고 있으며, 이러한 건물의 수평 및 수직 구조적 특성은 SUHI 강도와 상당한 관련이 있다(Li et al., 2020). 피어슨 상관분석 결과, 건물 구조와 관련된 변수와의 상관관계의 경우 단위지역 내 건축물 개수는 두 신도시 모두에서 SUHI 강도와 강한 양의 상관관계가 나타났으며, 특히 분당 신도시에서 더 강한 상관관계가 나타났다(Tables 6 and 7). 건폐율 역시 SUHI 강도와 유의미한 양의 상관관계를 보였으며, 건폐율의 경우 판교 신도시에서 그 상관관계가 더 높게 나타났다. 건축물이 존재하는 지역은 불규칙한 지형으로 인해 풍속이 감소하고 난기류는 축진되는데, 이때 건폐율이 증가함에 따라 복사열 흡수량과 인공열량이 증가하여 전체적인 온도가 증가하는 경향이 나타난다(Yeo et al., 2009). 창원시에서 원격탐사 및 지표온도 실측을 수행한 선행연구에서도 저층 주택단지의 평균온도가 고층아파트에 지역에

비해 최대 8°C까지 높게 나타났다(Song and Park, 2017).

반면 건물 구조의 또 다른 특성인 용적률과는 유의미한 상관관계가 없었으며, 건물 높이와 SUHI 강도는 두 신도시 모두 음의 상관관계를 나타냈다. Oke et al. (2017)에 따르면, 도시에서 낮 시간대 지표면 온도는 지붕 > 벽 > 바닥 > 주변 지역 순으로 높다. 고층 건물을 통해 형성된 도시 협곡에서는 그늘에 의한 표면 냉각효과가 발생하는데 식생이 존재할 경우 이러한 표면 냉각효과가 더 강해진다. 용적률의 경우 건축물의 연면적을 대지면적으로 나눈 비율로 건폐율과 층수의 곱으로 계산된다. 즉 같은 층수라도 건폐율이 높을 경우 용적률 또한 높아지게 되고 이는 직접적인 수직구조의 상승으로 이어지지 않게 된다. 따라서 같은 용적률을 가진 건축물 집단이라도 SUHI 강도의 일괄적인 경향성이 나타나지 않을 확률이 높고, 유의미한 상관성 또한 나타나지 않은 것으로 판단된다. Lee and Han (2019)의 연구에서는 지표면의 음영효과를 결정하는 표면거칠기 정도가 높은 수준일 때 용적률이 낮을수록 LST가 낮아졌고, 반대로 표면거칠기가 낮은 지역에서 용적률이 높을 경우 LST 또한 높은 결과가 나타났다. 즉 용적률은 대상지역의 건축 상태에 따라 상호작용하는 효과가 다르게 나타난다고 할 수 있다. 또한 이러한 결과는 특정 지역의 수직, 수평 구조를 획일적으로 정하는 계획보다는 음영효과를 고려한 3차원적인 계획의 중요성을 보여준다.

분광지수와와의 상관분석 결과, 두 분광지수 모두 기준

Table 6. Correlation of SUHI intensity in 2018 with indices of building structure as well as vegetation in Bundang new town

	SUHI intensity	Number of buildings	Coverage ratio	Floor area ratio	Building height	NDBI	NDVI
SUHI intensity	1.00	0.57**	0.28**	0.04	-0.23*	0.47**	-0.31**
Number of buildings	0.57**	1.00	0.36**	-0.03	-0.34**	0.34**	-0.24*
Coverage ratio	0.28**	0.36**	1.00	0.70**	0.07	0.19	-0.36**
Floor area ratio	0.04	-0.03	0.70**	1.00	0.56**	0.02	-0.22*
Building height	-0.23*	-0.34**	0.07	0.56**	1.00	-0.09	-0.02
NDBI	0.47**	0.34**	0.19	0.02	-0.09	1.00	-0.40**
NDVI	-0.31**	-0.24**	-0.36*	-0.22**	-0.21	-0.40**	1.00

*p < 0.05, **p < 0.01

Table 7. Correlation of SUHI intensity in 2018 with indices of building structure as well as vegetation in Pangyo new town

	SUHI intensity	Number of buildings	Coverage ratio	Floor area ratio	Building height	NDBI	NDVI
SUHI intensity	1.00	0.40**	0.348**	0.17	-0.23*	0.66**	-0.43**
Number of buildings	0.40**	1.00	0.436**	0.10	-0.42**	0.26**	-0.05
Coverage ratio	0.35**	0.44**	1.000	0.72**	-0.43**	0.36**	-0.14
Floor area ratio	0.17	0.10	0.724**	1.00	-0.01	0.26**	-0.09
Building height	-0.23*	-0.42**	-0.426**	-0.01	1.00	-0.22*	-0.02
NDBI	0.66**	0.26**	0.364**	0.26**	-0.22*	1.00	-0.44**
NDVI	-0.43**	-0.05	-0.136	-0.09	-0.02	-0.44**	1.00

*p < 0.05, **p < 0.01

연구에서 LST 분석연구에 활용되는 만큼 본 연구에서도 유의미한 상관관계가 나타났다(Tariq and Shu, 2020). SUHI 강도와 NDBI 사이의 양의 상관관계는 도시화가 강한 지역이 SUHI 현상 또한 심화됨을 나타내며, 본 연구에서는 판교 신도시에서 상관관계가 더 높게 나타났다. 이는 분당 신도시에 비해 상대적으로 낮은 도시구조적 특징에 의한 것으로 판단된다. 또한 SUHI 강도와 NDVI의 음의 상관관계는 SUHI 현상을 완화하기 위한 식생의 중요성을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 대한민국 두 개의 신도시를 연구지역으로 선정하여 1989년, 2000년, 2018년 3장의 Landsat 영상을 기반으로 신도시 개발이 진행됨에 따른 토지피복과 SUHI 현상 변화의 차이를 비교하였다. 또한 SUHI intensity에 영향을 끼칠 수 있는 도시구조적 특징들 간 상관분석을 수행하였다. 분석 결과 신도시 개발이 진행됨에 따른 토

지피복의 급격한 변화가 발생하였으며, 특히 대부분의 농업지역이 시가지역으로 변화한 것을 확인하였고, 이러한 도시화로 인한 SUHI 현상의 발생 및 강도가 지속적으로 높아지는 것 또한 확인하였다. 두 신도시 모두 아파트 및 고층 건축물이 분포하고 있는 지역에 비해 저층주거단지가 밀집된 지역이나 산업단지에서 상대적으로 높은 SUHI 강도가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 같은 저층주거단지 내에서도 건물밀도와 건폐율이 높은 분당신도시에서 상대적으로 높은 SUHI 강도가 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 저밀도 도시계획을 기반으로 저층건물비율이 높게 조성된 판교신도시에서도 도시조성에 따른 SUHI 현상의 급격한 확산을 확인할 수 있었다.

상관관계 분석 결과까지 종합적으로 살펴 보았을 때 이러한 건축물의 수평적, 수직적 구조가 SUHI 강도에 영향을 미치는 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. 판교 신도시의 전체적인 건축물 밀도와 용적률을 낮추는 계획을 통해 도시 형태를 조정하여 환경적인 측면을 개선하였으나, 저층건물 비율이 증가함에 따른 SUHI 강

도 증가가 나타난 것으로 판단된다. 하지만 밀집된 고층건물 또한 풍속에 부정적인 영향을 미치는 등 SUHI 강도에 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 일괄적인 건물 배치가 아닌 음영효과를 고려한 입체적인 도시계획을 수립하여 도시 전체적으로 쾌적한 열 환경이 구축될 수 있도록 해야 한다. 특히 저층주거지역 및 상업지역의 경우 열 저감 보도블럭 도입 또는 공원·녹지공간 확충 등 미시적인 열 환경 개선을 위한 추가적인 방안들이 마련되어야 하며, 이에 대한 폭넓은 연구들이 병행되어야 할 것이다.

사사

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원(과제번호: 2022R1I1A1A01065169)을 받아 수행되었습니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Cho, H., Ha, J., and Lee, S., 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. <https://doi.org/10.22669/krsa.2019.35.4.061>
- Clinton, N., and Gong, P., 2013. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sensing of Environment*, 134, 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.008>
- Guha, S., Govil, H., Dey, A., and Gill, N., 2018. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 667–678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- Kim, S., and Lee, S., 2020. Determinants of residential environment satisfaction in the second-generation new towns of the Seoul metropolitan area using web crawling and text mining. *Journal of Korea Planning Association*, 55(7), 5–20. <https://doi.org/10.17208/jkpa.2020.12.55.7.5>
- Kim, T., Lee, W. H., and Han, Y., 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. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2018.36.4.305>
- Kim, W., Lim, H., and Shin, H., 2021. Extraction of the severe heat island districts in urban areas by the clustering technique of land surface temperature distribution using satellite imagery. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 578–599. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.4.578>
- Lee, K., Kim, Y., Sung, H. C., Ryu, J., and Jeon, S. W., 2020. Trend analysis of urban heat island intensity according to urban area change in Asian mega cities. *Sustainability*, 12(1), 112. <https://doi.org/10.3390/su12010112>
- Lee, K., and Lim, C. H., 2022. Analysis of the surface urban heat island changes according to urbanization in Sejong city using Landsat imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(3), 225–236. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2022.38.3.1>
- Lee, S., and Han, J., 2019. Analysis of the relationship between three-dimensional built environment and urban surface temperature. *Journal of Korea Planning Association*, 54(2), 93–108. <https://doi.org/10.17208/jkpa.2019.04.54.2.93>
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J. P., and Rybski, D., 2020.

- On the influence of density and morphology on the urban heat island intensity. *Nature Communications*, 11, 2647. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16461-9>
- Miles, V., and Esau, I., 2017. Seasonal and spatial characteristics of urban heat islands (UHIs) in Northern West Siberian cities. *Remote Sensing*, 9(10), 989. <https://doi.org/10.3390/rs9100989>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Korea Land and Housing Cooperation, 2021. 2020 city planning status. Available online: <https://www.eum.go.kr/web/cp/st/stUpisStatDet.jsp> (accessed on July 10, 2023).
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J. A., 2017. *Urban climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Qaid, A., Lamit, H. B., Ossen, D. R., and Shahminan, R. N. R., 2016. Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. *Energy and Buildings*, 133, 577–595. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.006>
- Rendana, M., Idris, W. M. R., Rahim, S. A., Abdo, H. G., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A. et al., 2023. Relationships between land use types and urban heat island intensity in Hulu Langat district, Selangor, Malaysia. *Ecological Processes*, 12, 33. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00446-9>
- Saha, P., Bandopadhyay, S., Kumar, C., and Mitra, C., 2020. Multi-approach synergic investigation between land surface temperature and land-use land-cover. *Journal of Earth System Science*, 129, 74. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1342-z>
- Sekertekin, A., and 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. *Remote Sensing*, 12(2), 294. <https://doi.org/10.3390/rs12020294>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., and Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Song, B. G., and Park, K. H., 2017. Comparison of ASTER satellite and ground-based surface. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 20(3), 104–124. <https://doi.org/10.11108/kagis.2017.20.3.104>
- Sun, J., Yang, J., Zhang, C., Yun, W., and Qu, J., 2013. Automatic remotely sensed image classification in a grid environment based on the maximum likelihood method. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3–4), 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.063>
- Tariq, A., and Shu, H., 2020. CA-Markov chain analysis of seasonal land surface temperature and land use land cover change using optical multi-temporal satellite data of Faisalabad, Pakistan. *Remote Sensing*, 12(20), 3402. <https://doi.org/10.3390/rs12203402>
- Tran, D. X., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Myint, S. W., Caetano, M., and Kieu, H. V., 2017. Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 124, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.001>
- Viera, A. J., and Garrett, J. M., 2005. Understanding interobserver agreement: The kappa statistic. *Family Medicine*, 37(5), 360–363.
- Voogt, J. A., and Oke, T. R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wakeman, R., 2016. *Practicing utopia: An intellectual history of the new town movement*. The University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226346175.001.0001>
- Yeo, I., Yee, J. J., and Yoon, S. H., 2009. Analysis on the effects of building coverage ratio and floor

- space index on urban climate. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 29(3), 19–27.
- Yu, X., Guo, X., and Wu, Z., 2014. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829–9852. <https://doi.org/10.3390/rs6109829>
- Zanter, K., 2019. Landsat 8 data users handbook. Available online: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook> (accessed on July 25, 2023).