

# 도시의 3차원 물리적 환경변수와 지표온도의 관계 분석\*

## Analysis of the Relationship between Three-Dimensional Built Environment and Urban Surface Temperature

Li, Yige\*\* · 이수기\*\*\* · 한재원\*\*\*\*

Li, Yige · Lee, Sugie · Han, Jaewon

### Abstract

This study examines the relationship between three-dimensional urban built environment and urban surface temperature using LANDSAT 8 satellite image data in Seoul city. The image was divided into 600m×600m grid units as an unit of analysis. Due to the high level of spatial dependency in surface temperature, this study uses spatial statistics to take into account spatial auto-correlation. The spatial error model shows the best goodness of fit.

The analysis results show that the three-dimensional built environment and transport environment as well as natural environment have statistically significant associations with surface temperature. First, natural environment variables such as green space, streams and river, and average elevation show statistically significant negative association with surface temperature. Second, the building area shows a positive association with surface temperature. In addition, while sky view factor (SVF) has a positive association with surface temperature, surface roughness (SR) shows a negative association with it. Third, transportation related variables such as road density, railway density, and traffic volume show positive associations with surface temperature. Moreover, this study finds that SVF and SR have different effects on surface temperature in regard to the levels of total floor areas in built environment. The results indicate that interactions between floor area ratio (FAR) and three-dimensional built environmental variables such as SVF and SR should be considered to reduce urban surface temperature.

**키워드** 지표온도, 열환경, 3차원 물리적 환경, 위성영상, 원격탐사

**Keywords** Surface Temperature, Thermal Environment, Three-Dimensional Built Environment, Satellite Image, Remote Sensing

## 1. 서론

18세기 후반 시작된 산업혁명은 기존 도시의 산업화와 도시화를 가속했으며, 그로 인한 각종 사회 및 경제적 문제를 일으켰다. 도시로의 인구 집중에 따른 과밀 현상은 에너지, 환경, 경제, 사회적 문제점을 양산하였으며, 이를 해결하기 위해 효율적이고 생

산적인 도시형태뿐만 아니라 환경적으로 지속 가능한 도시형태가 점차 강조되고 있다. 뿐만 아니라 도시의 무분별한 팽창은 각종 환경문제를 발생시켰으며, 그 규모와 빈도는 점차 증가하여 도시 거주민의 생명과 건강을 위협하고 있다. 이러한 도시에서 인간 활동의 증가로 인한 대표적인 환경문제로 도시 열섬 현상(Urban Heat Island: UHI)이 있다.

\* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 19AUDP-B102406-05)으로 수행 되었으며, 2018년 대한국토·도시계획학회 춘계산학 학술대회에서 발표하여 우수논문상을 수상한 논문을 수정·보완하였음.

\*\* Graduate student, Dept. of Urban Planning & Engineering, Hanyang University

\*\*\* Professor, Dept. of Urban Planning & Engineering, Hanyang University (Corresponding author: sugielee@hanyang.ac.kr)

\*\*\*\* Graduate student, Dept. of Urban Planning & Engineering, Hanyang University

도시열섬은 도시 외곽지역의 온도보다 도시 중심의 온도가 상대적으로 높은 현상을 일컫으며, 도시 지표면 재질의 열 특성 변화와 증발산량의 부족으로 인해 발생한다(Oke, 1982). 또한, 건물 및 도로 등의 도시 구조물에 의해 낮 동안 흡수된 열이 해가 진 후 천천히 방출되어 도시와 교외 지역의 온도 차이를 만든다(Priyadarsini et al., 2008). 특히 불투수 아스팔트 및 콘크리트와 같이 도시의 지표면을 뒤덮는 피복 재료는 지표면의 열 특성과 반사도에 영향을 미쳐 도시의 온도 상승에 큰 영향을 미친다. 이와 함께, 도시 열섬현상의 원인으로 건조 환경에 의한 도시 미기후의 변화가 있다. 도시 건축물의 고층화는 도심과 교외의 공기 흐름에 영향을 주며, 이는 도시 열섬 현상의 중요 원인이 된다(Wong et al., 2010). 그리고 도시의 밀집된 건물은 태양열의 반사보다 흡수를 가속화 하여 도시 온도를 상승시키며, 풍속을 감소시킨다. 이로 인해 도심 바람의 원활한 흐름을 방해하여 대류 현상으로 인한 냉각 효과를 저해하여 도시 열섬현상을 심화시킨다(Landsberg, 1979).

도시화와 인간 활동의 증가로 인한 기온상승은 기후변화로 인해 더욱 가속화되고 있으며, 이로 인해 인명 피해 및 사회 경제적 피해가 급증하고 있다. 이는 도시의 기온 상승이 도시 거주민의 생명에 중요한 부분을 차지하고, 기온 상승의 원인과 이로 인해 발생하는 환경 변화에 대한 이해와 대책 마련이 시급함을 의미한다.

한편, 일반적으로 도시 중심부의 높은 접근성은 지대를 상승시키는 원인이 되며, 이러한 높은 지대에 부응하기 위하여 집약적인 토지이용이 요구된다. 그 결과 도시 중심부에는 초고층 복합건물이 위치하게 되고, 상대적으로 지대가 낮은 도시 외곽지역에는 저층, 단일 용도의 건물이 주로 분포하게 된다. 그러나 최근 공동주택의 고층화와 대형 복합 쇼핑몰의 확산으로 인해 건물의 고층화와 대형화가 외곽 지역으로 점차 확대되고 있다. 이로 인한 대도시지역의 녹지감소와 불투수면의 증가는 지표온도 상승에 영향을 미치고 나아가 도시열섬현상의 심화를 가져올 수 있다.

그러나 인간 활동의 결과인 건조환경(built environment)에 따른 지표온도 변화와 지표온도에 영향을 미치는 3차원 물리적 환경 요인에 대한 연구는 그 필요성에 비하여 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 지표면 온도의 분포와 지표온도에 영향을 미치는 3차원 물리적 환경 구성 요소와의 관계를 규명하고, 이를 통해 향후 지표온도와 장기적으로 도시열섬 저감을 위한 도시계획 및 설계요소를 제시하고자 한다.

## II. 선행연구 고찰

### 1. 지표온도에 영향을 미치는 요인

급격한 도시화와 기후변화로 인해 도심 내 온도가 주변 지역보

다 급격히 상승하는 도시 열섬현상과 그로 인한 문제점을 해결하기 위한 다양한 연구가 이루어졌다.

김수봉 외(2001)의 연구는 자동차 배기가스에 의한 대기오염, 도심 거주민의 활동으로 인한 인공 열, 건설 및 지표면 포장에 의한 지상 피복 상태 변화 등이 도시 열섬 현상의 주된 원인으로 지목하고 있다. 또한, 그들의 연구는 도시의 피복 상태의 차이로 인한 태양 복사 에너지의 흡수율, 낮은 반사율 그리고 증산 작용 등이 도시 기온에 밀접하게 연관되어 있다고 하였다. 다른 한편으로 Susca et al.(2011)와 Oliveira et al.(2011)은 식생이 풍부한 지역이 그렇지 않은 지역보다 평균 기온이 낮았음을 확인하였고, 이는 녹지와 인공 피복의 열 저항성 차이, 식생 현황 그리고 알베도 차이로부터 기인한다고 하였다. 이처럼 도시의 피복 상태는 궁극적으로 도시 기온에 영향을 미치게 된다.

Chen et al.(2006)은 UHI와 토지 피복 변화 사이의 관계를 분석을 위해 정규 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI), 정규 물 지수(Normalized Difference Water Index: NDWI), 정규 나지 지수(Normalized Difference Bareness Index: NDBaI), 정규 건물 지수(Normalized Difference Built-up Index: NDBI)와 지표온도 사이의 상관성 연구를 통해 정규 나지 지수(NDBaI)와 정규 건물 지수(NDBI)가 지표온도와 양(+)의 관계가 있는 것을 확인하였다. 또한, 그들의 연구는 지표온도가 지표의 피복 상태에 따른 태양 복사에너지의 흡수와 반사도 등, 지표 재질의 특성과 차량의 이동, 각종 토지이용 및 인간의 활동으로부터 기인한다고 하였다.

한편 앞서 소개한 연구들이 인간 활동으로 인한 교통량의 증가, 지표의 피복 상태 변화, 토지이용의 유형 등 2차원적 평면적 요소에 치중하였다면 3차원 입체적 물리 환경요소가 열섬에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되었다. 건물밀도, 토지이용, 도로, 건물 변수와 함께 천공개폐율(sky view factor), 표면 거칠기(roughness) 변수를 이용하여 기온이나 통풍(ventilation)과의 영향관계를 파악하였다(Grimmond, 2007; Giridharan et al., 2004; Giridharan et al., 2007; Gál et al., 2009; Wang & Akbari, 2014; Wang & Akbari, 2016). 또한, 건물 부피를 제외한 빈 곳의 비율을 의미하는 공극률(porosity), 건물 정면 계수(building aspect ratio)등과 기온과의 관계를 살펴본 연구도 있다(Georgakis & Santamouris, 2006; Niachou et al., 2008; Memon et al., 2010; Gál & Unger, 2009).

그러나 기존 연구들은 도시의 평면적 물리적 환경과 3차원 입체적 물리적 환경, 그리고 인공열과 같은 요인을 종합적으로 고려하지 않고 있다. 또한, 대부분의 연구가 도시열섬현상에 집중하고 있어 3차원 물리적 환경요인이 지표온도에 미치는 영향은 충분히 연구되지 못하였다. 나아가 대부분의 선행연구는 지표온도나 대기온도에 미치는 독립 변수들 사이의 상호작용 효과에 대한 분석이 이루어지지 않았다. 마지막으로 대부분의 선행 연구가

지표온도나 대기온도가 가지는 공간적인 자기상관을 제어하지 않고 전통적인 회귀 분석방법을 사용하여 분석결과 편이(bias)를 가지고 있어 보다 정밀한 방법론의 활용이 필요하다.

## 2. 위성영상을 이용한 지표온도 연구

위성영상 자료는 넓은 지역의 종합적인 정보를 적은 비용으로 손쉽게 취득할 수 있다는 장점이 있을 뿐만 아니라, 도시지역에 대한 시계열적 이미지를 얻을 수 있어 매우 효율적인 수단이라 할 수 있다. 특히 지표온도와 같이 넓은 지역을 대상으로 현황을 파악하는 데 있어 위성 영상 자료의 활용은 매우 유용하다.

엄대용(2006)은 광역 지역에 대한 지표온도 추출을 위해 LANDSAT TM/ETM+ 영상을 획득하여 기하 보정 및 방사 보정을 하고 NASA(National Aeronautics and Space Administration) 모델을 이용하여 지표온도를 추출하였다. 그리고 대상 지역에 대한 피복 분류를 통해 고유 방사율을 적용하는 1차 보정을 하고, 기상청 기온자료와의 상관관계를 통해 얻은 보정식을 토대로 영상으로부터 획득한 지표온도를 이차적으로 보정함으로써 영상을 이용한 지표온도 추출의 정확도를 향상하는 방안을 제시하였다. 또한, 김미경 외(2014), 김태현 외(2018)는 LANDSAT 위성영상을 활용하여 연구대상 지역의 토지피복의 상태, 밝기온도 등을 활용하여 지표온도를 산출하였다.

Suga et al.(2003)은 LANDSAT 7/Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM+)의 열 적외선 밴드 영상 데이터로부터 유도된 지표온도에 대한 검증 연구를 일본 히로시마와 서부해안 지역의 대상으로 진행하였다. 실제 측정된 데이터와 영상자료를 통해 추정된 지표온도와의 비교를 위해 분광복사 함수를 기반으로 한 수식이 적용되었으며, 이를 적용한 지표온도가 실제 측정된 데이터와 매우 근접함을 확인하였다.

이처럼 위성영상자료인 LANDSAT 자료는 광범위한 지역과 실제 조사를 위한 접근이 어려운 지역에 대한 지표온도 측정에 매우 유용하고 높은 신뢰수준을 제공하는 자료이며, 다양한 연구에 활용되고 있음을 확인할 수 있다. 나아가 위성영상으로 도출된 지표온도를 대기 온도로 전환하여 도시열섬현상 분석을 위한 자료로도 활용되고 있다.

그러나 위성영상으로부터 취득된 지표온도 자료는 해당 지역의 실제 지표온도와 차이를 나타내는데 이는 지표의 온도 정보가 지구 대기를 거쳐 우주 공간상의 위치하는 위성 센서에 전달되는 과정에서 자료의 왜곡이 발생하기 때문이다. 따라서 더욱 정확한 지표온도 측정을 위해 대기 상태와 지표면에서 발생하는 열복사와 반사를 고려한 보정작업이 필요하다.

## 3. 선행연구의 한계점

기존 연구에서는 위성 영상 자료를 활용하여 지표의 특성과 지표온도 사이의 관계에 주목하였다. 지표는 낮 동안 태양 복사 에너지를 축적하고 밤에 복사열을 대기로 방출한다. 따라서 지표온도는 도시열섬현상과도 밀접한 관련이 있다. 그러나 기존 연구는 평면적 수준에서 지표 특성과 지표온도와의 관계를 주로 다루었으며, 3차원 입체적 물리 환경에 대한 종합적인 고려는 충분히 이루어지지 않았다. 그리고 지표온도에 영향을 미치는 변수들 사이의 상호작용 효과에 대한 연구도 부족한 실정이다. 예를 들어 도시의 밀도를 대변하는 용적률과 천공개폐율의 상호작용은 지표온도에 유의한 영향을 미칠 수 있다.

다음으로 도시공간의 지표온도는 입체적 물리 환경요인뿐만 아니라 인공적인 열을 발생시키는 건축물이나 자동차 교통량과 밀접한 관련이 있을 수 있다. 일반적으로 인공열은 대기온도보다 밀접한 관련이 있지만, 지표를 향하고 있는 건물의 열 배출과 자동차 통행량은 지표온도에도 큰 영향을 미칠 수 있다.

그리고 위성 자료를 통한 지표온도 측정과 관련된 연구들은 대기의 상태에 따른 지표면 정보의 왜곡 문제를 해결하기 위하여 일련의 보정 작업이 필요하다. 특히 지표온도의 추출에 있어 대기 중에서 방출 및 흡수하는 열복사와 지표에서 방출하는 열복사에 대한 보정 작업을 진행하여 지표온도의 정확도를 높일 필요가 있다.

마지막으로 지표온도는 지리적 위치에 따라 특성이 변화하는 공간 자료의 속성을 지니고 있다. 공간 자료의 속성은 Tobler(1970)가 제시한 지리학 제1 법칙의 개념과 같이 공간적으로 가까이 있는 것이 멀리 있는 것보다 높은 상관성을 가진다. 이러한 공간자료의 속성을 공간적 자기상관(spatial autocorrelation)으로 설명할 수 있으며, 공간적 자기상관이 심각할 경우 전통적인 회귀 분석모형의 기본 가정을 위배하며 분석결과 편이(bias)가 발생한다.

따라서 본 연구는 위성영상자료인 LANDSAT 8 TM 자료와 공간적 자기 상관을 제어할 수 있는 공간통계 모형을 활용하여 도시공간의 3차원 물리 환경 요소와 지표온도와의 관계를 분석한다. 특히 도시공간의 인공 열 발생요소인 건축물과 교통량 요인을 종합적으로 고려하여 3차원 입체적 물리적 환경이 지표온도에 미치는 영향을 분석한다.

## III. 연구의 범위 및 방법

### 1. 연구의 범위와 흐름

본 연구는 서울시를 대상으로 하며 2016년 5월 19일의 위성 영상 자료를 이용하였다(그림 1 참조). 물리적 환경 변수는 2016년

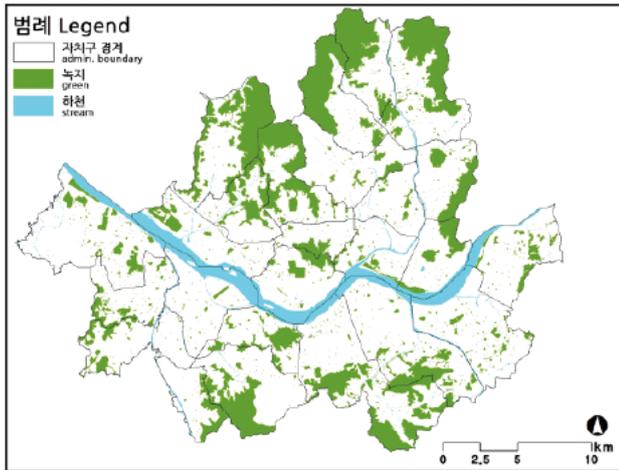


그림 1. 연구사례지역  
Figure 1. Study area

건축물대장 자료를 활용하였으며, 교통량 변수는 한국교통연구원에서 제공하는 2015년 서울시 추정교통량을 사용하였다. 교통량 자료는 1년 평균 교통량으로 추정된 자료이기 때문에 2016년에도 큰 변화가 없을 것으로 판단하였다.

한편 LANDSAT 8 위성 자료의 해상도는 30m×30m 해상도를 제공하고 있으나, 3차원 물리적 환경 분석 단위로 매우 작기 때문에 분석 단위를 600m×600m 그리드 1,839개로 지정하였다. 종속변수는 분석단위가 되는 그리드(600m×600m) 안의 400개 지표온도 픽셀의 평균 지표온도 값을 활용하였다.

## 2. 연구의 방법론

### 1) 물리적 환경 변수 구축

도시의 토지 피복 상태는 지표온도 및 기온과 관계가 있으며, 녹지와 수면은 기온을 저감 하고, 포장도로, 건폐지, 나대지 등은 기온 상승에 영향을 미친다(조성모 외, 2009). 이는 토지의 피복, 즉 지표의 상태가 도심 기온에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 또한, 도심 온도상승의 주요 인자 중 하나로 아스팔트로 포장된 자동차 도로가 있다(조혜진·임지현, 2011; Doulos et al., 2004). 도시화로 인해 지표면의 변화 중 가장 대표적인 것이 도로면적의 증가이다. 도로면적의 증가는 상대적 녹지감소로 이어지게 되며, 이로 인해 도로의 표면 반사율이 낮아 태양 복사 에너지를 흡수하여 지표면 온도를 상승시키는 원인으로 작용할 수 있다.

그뿐만 아니라 도로의 증가는 교통량의 증가를 초래하며 이는 차량으로부터 인공 열 배출을 증가시켜 지표온도 뿐만 아니라 기온 상승의 원인이 된다. 따라서 도로와 철로 등과 같은 교통 관련 시설은 토지의 피복을 변화시켜 지표 온도 상승에 영향을 미치는 요인으로 작용할 수 있다. 이와 함께 도시의 3차원 물리 환경적 요소인 용적률, 천공개폐율, 표면 거칠기 등도 건물에 의한 음영과 공기의 흐름과 통풍 등을 통해 지표온도에 큰 영향을 미칠 수

있다.

한편 LANDSAT 위성영상 자료는 대규모 범위의 분석이 가능할 뿐만 아니라, 도시의 소규모 특정 지역을 상세한 분석을 가능하게 한다. 그뿐만 아니라 고해상도 위성영상은 포함되는 정보량이 많아 정확도가 매우 높다(윤근원 외, 2003).

따라서 본 연구는 바람과 구름의 영향이 없는 맑은 날을 기준으로 2016년 5월 19일에 촬영된 고해상도 LANDSAT 8 위성 영상의 열 밴드(11, 12)를 조합하여 서울시의 지표온도를 산출하였다. 도시의 지표온도 연구를 위해 여름철 가장 더운 날을 기준으로 하는 것이 바람직 하지만 조건에 맞는 영상이 많지 않아 5월 19일 영상을 활용하였다. 바람과 구름의 영향이 없는 맑은 날 촬영된 고해상도 위성영상으로 충분한 지표온도의 변화의 폭(variation)을 보여주고 있어 분석에 활용하는 데 큰 문제가 없다고 판단하였다.

또한, 건축물대장과 교통량 자료를 토대로 도시의 평면적 물리 환경 요소와 3차원 물리적 환경요소, 그리고 교통량과 같은 인공 열 요인이 지표온도에 미치는 영향을 분석하였으며, 분석에 활용된 물리적 환경변수는 <표 1>과 같다. 서울시 건축물대장 및 위성영상자료에서 제공하는 수치 표고 모델(Digital Elevation Model, DEM) 자료를 이용하여 자연환경, 물리적 환경, 교통환경 부분의 변수를 구축하였고, 교통량 자료는 한국교통연구원에서 제공하는 추정 교통량 자료를 활용하였다.

본 연구에서 고려한 주요한 3차원 물리적 환경 변수는 용적률, 천공개폐율, 표면 거칠기이다. 또한, 지표온도와의 관계 분석을 위해 용적률과의 상호작용 변수를 구축하여 분석에 활용하였다. 선행연구 고찰에서 살펴본 것처럼 이러한 변수는 태양 일사량, 건물에 의한 그림자, 건물 사이의 공기의 흐름 등에 변화를 주어 지표온도와 궁극적으로 대기온도에 영향을 미치는 요소이다.

천공개폐율은 지표면에서 하늘을 바라보았을 때, 시각적으로 얼마나 개방되어 있는지를 정량적으로 측정할 수 있는 변수이다. 시각적인 개방 정도를 표현하는 간단한 방법은 입체각을 활용하는 것이다. 물체의 입체각은 물체가 측정 지점을 중심으로 반구체에 투영된 면적과 정비례한다. 천공개폐율은 <그림 2> (a)의 2차원 단면에서 나타난 것처럼 특정 관측 지점에서 관측되는 하늘 부분을 ( $\Omega$ )로 정의 하고, <그림 2> (b)에서 지정된 반경 R에 해당하는 n개 방향의 수평선  $\gamma_i$ (8개)의 수직 고도각을 이용하여 계산하며, 천공개폐율을 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$SVF(\text{천공개폐율}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sin \gamma_i}{n} \quad (1)$$

식(1)에서  $\gamma_i$ : 수평선의 수직 상하 각을 의미하며, n: 계산 시 나누는 방향 수를 의미한다. 또한, 정밀한 천공개폐율 값 산정을 위하여 Relief Visualization Toolbox를 이용하여 기존 8개 방위

표 1. 변수의 정의 Table 1. Definition of variables

변수 Variables		설명 Description
지표온도 Land surface temperature		Average surface temperature in a 600m × 600m grid cell of 400 pixels (°C)
자연환경 Natural environment	녹지 면적 Green area	Area of parks and small green areas (m <sup>2</sup> )
	하천 면적 River area	River and stream area (m <sup>2</sup> )
	평균 표고 Average elevation	Average that height from the extension of sea level to that point (m)
	경사도 Slope	The value of the slope as an angle to the horizontal plane (0°~90°)
물리적환경 Three-dimensional built environment	건축면적(평면적) Building area	Floor area on the first floor (m <sup>2</sup> )
	건축 연면적 Total floor area	The total floor area of a building (m <sup>2</sup> )
	천공개폐율 Sky view factor (SVF)	Proportion of the sky that is visible from a given viewpoint (Oke, 1981) (0~1)
	표면거칠기 Surface roughness (SR)	Standard deviation of complex DEM data including terrain and buildings
교통환경 Transport environment	철도시설 밀도 Railway density	The railway extension by grade divided by the target area (km/km <sup>2</sup> )
	도로시설 밀도 Road density	The road extension by grade divided by the target area (km/km <sup>2</sup> )
	교통량 Traffic volume	Number of traffic passing through from 10:00 to 12:00 (vehicle/hour)

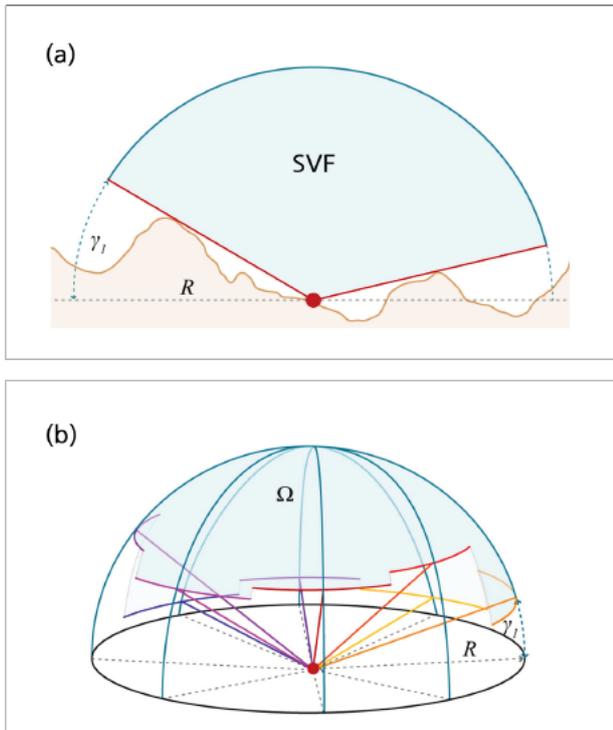


그림 2. 천공개폐율의 개념  
Figure 2. Concept of sky view factor

출처: Zakšek et al. (2011, p.403)

에서 32개 방위를 지정하여 분석하였다(Kokalj et al., 2011; Zakšek et al., 2011; Kokalj et al., 2013).

천공개폐율이 지표온도에 미치는 영향은 복잡적이며 일조에 의한 효과와 통풍에 의한 효과로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 천공개폐율이 높을 경우 공기의 흐름에 의해 지표온도를 줄이는 효과도 있지만, 공간이 많이 열려있어 태양의 직사광선을 지표가 받기 때문에 지표온도의 상승이 더 커질 것으로 판단된다.

표면거칠기는 지표면의 울퉁불퉁한 정도를 반영하는 변수로서 조건에 따라 다양한 특성과 명칭이 부여된다. 본 연구에서는 지형과 건물의 복합 DEM 데이터를 이용하여 표면거칠기를 계산하였다. 이를 위해 복합 DEM의 표준편차(Standard Deviation)를 계산하여 표면거칠기 지표로 활용하였다. 표준 편차는 자료의 값이 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 나타내며, 표준편차를 산정하는 식은 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

표면 거칠기는 그 값이 클수록 지표면 기복이 많음을 의미한다. <그림 3>은 표면거칠기의 개념을 설명하는 것으로 (a)와 (d)의 경우 표면거칠기 값이 작으나 (b)와 (c)의 경우 표면거칠기

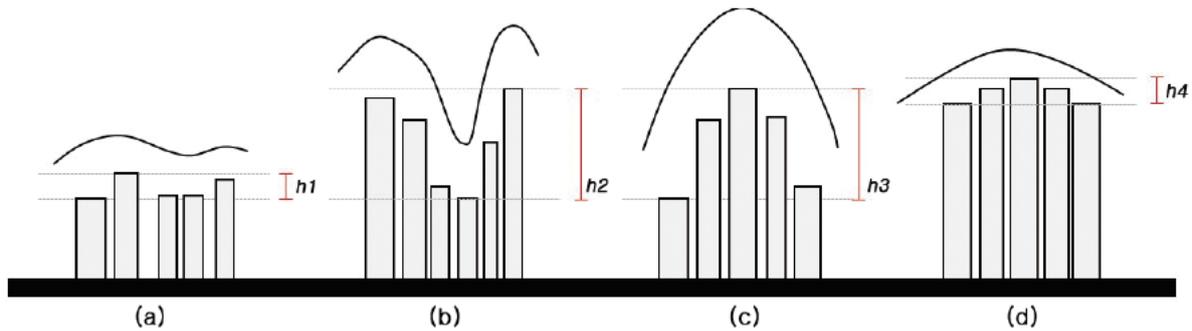


그림 3. 표면거칠기 예시  
Figure 3. Concept of surface roughness

값은 크다.

표면거칠기와 지표온도의 관계도 복잡적이다. 일반적으로 표면거칠기가 클수록 건물의 층수가 다양하여 건물에 의한 음영효과가 커지기 때문에 지표온도를 저감시키는 역할을 한다. 그러나 다른 한편으로 표면거칠기가 커질 경우 공기의 흐름을 방해하여 지표온도 저감효과를 감소시킬 수도 있다. 또한, 용적률의 수준에 따라 표면거칠기가 지표온도에 미치는 영향은 달라질 수 있다. 지표온도의 경우 태양의 직사광선에 가장 큰 영향을 받기 때문에 표면거칠기의 경우에도 지표에 대한 건물에 의한 음영효과가 공기의 흐름이나 통풍 효과보다는 더 클 것으로 판단된다.

## 2) 분석 방법론

공간 자료가 가진 독특한 속성 중에 공간적 자기 상관성이 있다. 공간적 자기 상관성은 특정 지역에서의 관측치가 인접 지역의 관측치와 상관이 있음을 의미하며 이러한 상관관계는 관측치의 오차를 발생시킬 수 있어 이에 대한 고려가 필요하다(변필성, 2009; 이희연 외, 2013).

일반적으로 공간적 자기 상관성이 없는 경우, 최소자승(Ordinary Least Square, OLS)법을 사용하는 회귀모형을 통해 분석을 진행한다. OLS 모형은 공간자료가 갖는 속성을 고려하지 않고 다중 선형회귀 방법을 이용하여 모형을 구축하며, 자료들은 상호 독립적인 것으로 가정한다. 그러나 종속변수나 오차항 간의 공간적 자기 상관성이 있는 경우 회귀계수가 편향되고 R-squared 값이 과다 추정되는 문제가 있기 때문에 공간 자기 상관성을 고려한 모형의 적용이 필요하다(이희연 외, 2013).

이러한 공간적 자기 상관성의 존재를 파악하기 위하여 Anselin (1988, 2005)은 Moran's I값을 활용한 공간시차모형(Spatial-Lag Model: SLM)과 공간오차모형(Spatial-Error Model: SEM)을 제시하였다.

공간적 자기상관을 측정하는 Moran's I값은 인접한 지역의 값이 비슷한 특성을 갖게 되면 (+)의 값을 가지며, 그와 반대인 경우 (-)값을 갖게 된다(-1 ≤ Moran's I ≤ 1). 절댓값이 클수록 공간적 자기 상관이 높고 절댓값이 0에 가까워질수록 공간적 자기

상관이 없는 상태를 의미하며, 통계적 유의도 검증을 통해 공간적 자기 상관의 유무를 판단한다.

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum \sum w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{W \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

W: 공간가중행렬,  $x_i$ : 공간  $i$ 의 값,  $\bar{x}$ :  $x$ 의 평균값,  $n$ : 개체수

Moran's I는 전체 연구 대상지에 대한 공간적 자기 상관성을 파악하는데 쉽지만, 국지적인 공간에 대한 자기 상관성을 파악하기에는 한계가 있다(윤희정, 2013; 장운정·이승일, 2009). 이러한 국지적인 공간에 대한 자기 상관성을 파악하기 위하여 Anselin(1995)이 고안한 LISA(Local Indicators of Spatial Association) 지표를 이용한다. LISA는 공간 자기 상관의 국지적 변화를 고려한 시각적 지표로서 특정 공간의 자기 상관성 정도를 보여주는 클러스터(핫스팟) 맵과 클러스터별 통계적 유의성을 검증하는 맵을 동시에 제공한다. 이때 클러스터맵은 값이 큰 지점이 상호 인접한 경우 H-H(High-High), 값이 낮은 지점이 상호 인접한 경우 L-L(Low-Low), 값이 낮고 높은 지점이 상호 인접한 경우 L-H(Low-High), 값이 높고 낮은 지점이 상호 인접한 경우 H-L(High-Low)의 네 개 범주로 표기된다.

공간시차모형(SLM)은 종속변수가 공간적 자기 상관성을 갖고 있는 경우 사용되는 모형으로, 일반적으로 종속변수에서 공간적 종속성이 존재하면 공간시차모형을 이용하는 것이 바람직하다. 종속변수가 의존성을 갖게 되면 주변지역으로부터 영향을 받게 되는데 이러한 영향을 공간시차 변수로 반영하는 것이다 (Anselin, 2005; 이희연 외, 2013).

$$y = \rho W y + x \beta + \varepsilon \quad (4)$$

W: 공간가중행렬,  $x$ : 설명변수,  $\rho, \beta$ : 계수,  $\varepsilon$ : 오차항

수식(4)에서  $W y$ 는 공간 공간시차변수로 종속변수와 인접한 값

의 회귀로 자기상관성을 제어해준이의 의존도를 측정할 수 있는 변수이며,  $\epsilon$ 는 독립 잔차 확률 변수로 구성된 잔차 벡터이다.

반면, 공간오차모형(SEM)은 오차에서 공간적 자기상관성이 존재하는 경우에 활용된다. 오차에서 공간적 자기상관성이 발생하는 경우는 공간자료가 집계되는 공간단위와 특정현상이 발생하는 공간단위의 불일치로 인해 발생하거나 공간적 자기상관이 발생하는 변수를 관측할 수 없어 회귀모형에 투입하지 못하여 발생하게 된다. 공간오차모형의 기본 개념은 오차 사이에 존재하는 공간 종속성을 통제하기 위해 오차 공분산을 만들어 회귀 모형 내에서 공간적 상호 작용의 영향을 고려하는 것이다(Anselin, 2005; 이희연 외, 2013).

$$y = X\beta + \epsilon, \epsilon = \lambda W\epsilon + \mu \quad (5)$$

$\epsilon$ 는 잔차 벡터이며,  $W\epsilon$ 는 공간가중행렬로서 지역 간의 인접 관계를 반영한다. 또한  $\lambda$ 는 공간자기회귀계수로 전체 지역 사이의 의존도를 측정하는 변수이다.

### 3. 위성영상을 활용한 지표면 온도 추출

LANDSAT 8 위성영상에 포함된 열 밴드를 기반으로 LANDSAT 8 TIRS를 이용하여 지표온도 추출이 가능하며, 지표온도를 계산하는 과정은 <그림 4>와 같다(Zhang et al., 2002). AVHRR, ATSR 및 ASTER와 같은 다중 열 대역 시스템과 달리 단일 열 대역을 가

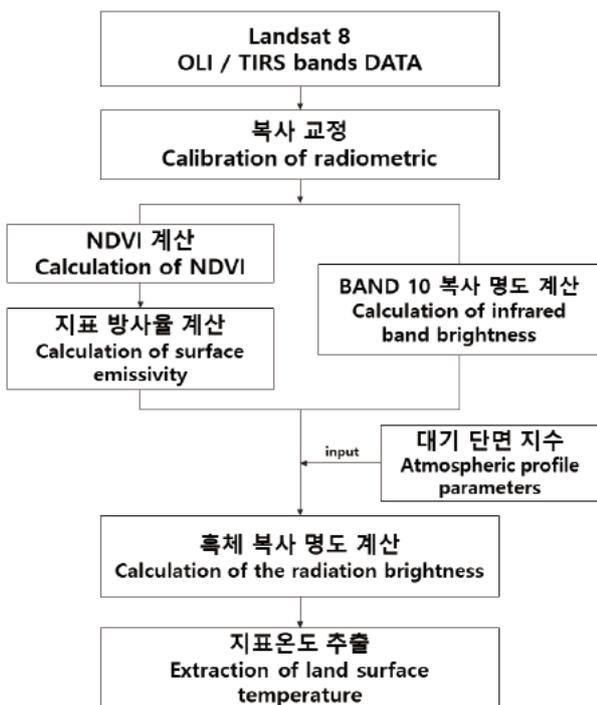


그림 4. 지표온도 추출과정

Figure 4. Process of extracting surface temperature

진 LANDSAT 계측기는 대기 영향에 대한 고유한 보정 값을 제공하지 않아, 대기상부(TOA)복사, 지표방출 복사 및 온도를 보정하기 위해 이를 보조할 수 있는 데이터가 필요하다(Barsi et al., 2005).

지면에 표적을 남기는 방출 신호는 대기에 의해 약해지고 강화되므로 열 대역 이미지를 사용한 절대 온도 연구에서 대기의 영향을 제거하는 것은 필수적이다. 이를 위해 지표 열복사 값을 측정하고 이를 위성 센서를 통해 얻는 열복사 총량에서 빼서 지표 열복사 강도를 추출한다. 그 다음 지표 열복사 강도를 전환해 지표 온도를 얻게 된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L\lambda = [\epsilon B(T_s) + (1-\epsilon)L\downarrow]\tau$$

$$B(T_s) = [L\lambda - L\uparrow - \tau(1-\epsilon)L\downarrow] / \tau\epsilon \quad (6)$$

$L\lambda$ 는 센서에 의해 등록된 휘도이며,  $B(T_s)$ 는 플랑크 법칙에 의한 표면 온도와 관련된 흑체 복사,  $T_s$ 는 LST,  $L\uparrow$ 과  $L\downarrow$ 는 용승 및 하강 대기의 복사도,  $\tau$  대기 투과율 그리고 지표의 표면 방사율이다. 또한,  $T_s$  값의 경우 플랑크 공식을 이용해 산출할 수 있다.

$$T_s = K_2 / \ln [K_1 / B(T_s) + 1] \quad (7)$$

이때, TM 영상인 경우,  $K_1 = 607.76W / (m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ ,  $K_2 = 1260.56K$  ETM+ 영상이면,  $K_1 = 666.09W / (m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ ,  $K_2 = 1282.71K$  TIRS 영상이면,  $K_1 = 774.89W / (m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ ,  $K_2 = 1321.08K$ 이며, Atmospheric Profile Parameters(대기단면 지수)인  $L\uparrow$ ,  $L\downarrow$ ,  $\tau$ 는 NASA에서 제공한 계산식을 통해 영상촬영 시간과 중심 경도 및 위도를 입력하여 얻을 수 있다(Wang et al., 2018).

## IV. 분석결과

### 1. 위성영상을 활용한 지표온도 분석

본 연구는 날씨가 맑고 바람과 구름이 거의 없는 2016년 5월 19일 위성 영상 자료를 활용하여 분석하였다. 위성영상 이미지 분석을 위해 Harris Geospatial Solutions에서 제공하는 ENVI5 소프트웨어를 활용하였다. ENVI5는 디지털 이미지를 시각화, 분석과 표현을 위해 사용되는 소프트웨어로, 기하학적 보정, 지형분석, 레이더 분석, 래스터 및 벡터 이미지의 분석 등을 지원하며 영상자료의 분석에 보편적으로 이용되고 있다.

<그림 5>는 2016년 5월 19일 촬영한 위성영상을 이용하여 산출한 서울시 지표온도이며, 시가지 지역의 온도가 수면이나 공원녹지지역 보다 확연하게 높은 것을 알 수 있다. 또한, 하천지역의 온도는 산림지역 온도보다 훨씬 낮게 분포되어 나타나고 있다. 지표온도 지도에서 지표온도가 높게 나타난 부분은 주로 도심과 부

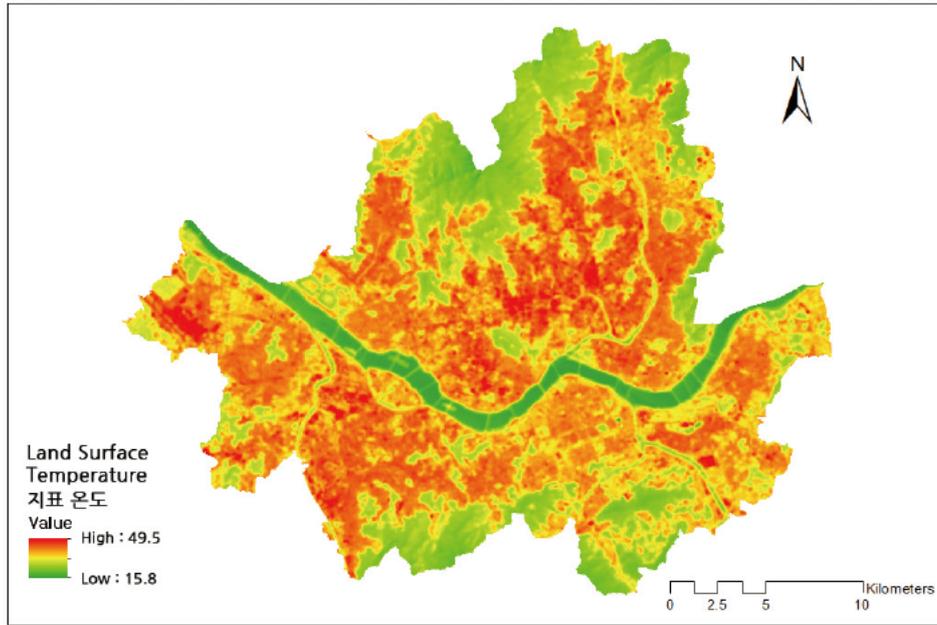


그림 5. 서울시 지표온도 (2016년 5월 19일)  
Figure 5. Seoul's surface temperature (May 19, 2016)

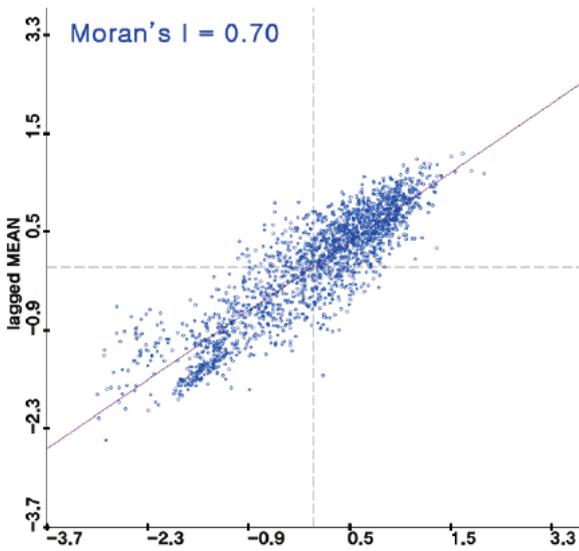


그림 6. 지표온도 Moran's I 산포도  
Figure 6. Moran's I scatter plot of surface temperature

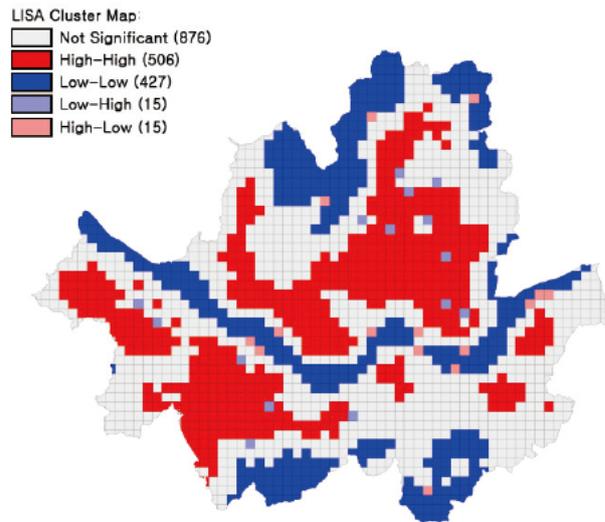


그림 7. 지표온도 LISA 핫스팟 분석  
Figure 7. Surface temperature LISA hotspot analysis

도심 등 도시화 지역이며 교통시설과 공항시설 등에서도 높게 나타났다.

## 2. 지표온도에 영향을 미치는 물리적 환경 요인 분석

지표온도는 지리적 위치 특성에 따라 변화하는 속성을 가진 공간 데이터이다. 따라서 지표온도는 공간적 자기상관성이 높은 것으로 가정할 수 있으며, 이러한 공간 자기 상관 및 공간 모델링을 제어할 수 있는 GeoDa Software를 통해 모형의 적합성을 검증하였다. GeoDa Software는 Anselin(2005)에 의해 개발되었으

며, 공간분석, 다수준 변수의 탐색 및 데이터 분석이 가능하다. 또한, 선형회귀 분석과 함께, 공간통계모형과 관련하여 공간시차 모형(Spatial Lag Model: SLM)과 공간오차모형(Spatial Error Model: SEM)을 포함한다.

〈그림 6〉와 〈그림 7〉은 지표온도의 공간적 자기상관 분석을 나타낸다. Moran's I 산포도와 LISA 클러스터 지도에 따르면 평균 지표온도는 Moran's I값이 0.7로 매우 높은 양(+)의 공간적 자기상관을 나타내었다. 또한, LISA 클러스터 지도를 통해 핫스팟 분석을 실행하였다. 주변지역과 함께 지표온도가 높은 곳은 붉은색 군집, 낮은 곳은 푸른색 군집으로 표시된다. 특히 붉은색 군집은

지표온도가 높은 핫스팟이다. 서울시의 경우 대체로 지표온도는 강북도심과 영등포 여의도 부도심 그리고 공항시설이 입지하고 있는 강서구 등에서 높게 나타나고 있으며 국립공원과 자연녹지 그리고 한강을 중심으로 지표온도가 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

〈표 2〉는 지표온도에 영향을 미치는 요인에 대한 기술 통계량 분석 결과이다. OLS모형과 공간회귀모형을 위해 도시의 물리적 환경 변수를 독립 변수로, 평균 지표온도를 종속 변수로 설정하여 분석을 진행하였다. 총 1,839개 표본을 대상으로 하였으며, 선형회귀모형(OLS), 공간시차모형(SLM), 공간오차모형(SEM)을 비교하여 본 연구에 적합한 모형을 선택하였다. 회귀분석결과는 다음과 같다(표 3 참조).

첫째, 전통적인 OLS 모형의 경우 Moran's I값이 0.422로 높고 통계적으로 매우 유의하여 공간적 자기 상관이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 OLS 모형 보다는 공간적 자기상관을 제어할 수 있는 SLM 또는 SEM 모형의 고려가 필요하다. 한편, SLM 모형의 경우 잔차의 Moran's I값이 0.164로 공간적 자기상관이 일부 남아 있는 것을 볼 수 있었으며, SEM 모형의 경우 잔차인 Moran's I값이 -0.0002이고 통계적으로 유의하지 않아 공간적 자기 상관이 완전히 제거되었음을 알 수 있다. 따라서 모형적합도인 AIC 와 SC 값과 공간적 자기상관 제어효과를 고려할 때 공간시차모형(SEM)이 더 타당한 것을 알 수 있다.

둘째, 자연환경 요인인 녹지면적, 하천면적, 평균 표고, 경사도 등의 지표는 지표온도와 모두 음(-)의 관계를 나타내었다. 우선

표 2. 변수에 대한 기초 통계량 Table 2. Descriptive analysis

변수 Variable	평균 Mean	표준편차 Std. Dev.	최솟값 Min	최댓값 Max		
자연 환경 Natural environment	녹지면적 Green area (m <sup>2</sup> )	86,756.53	133,006.33	0	720,000.00	
	하천면적 River area (m <sup>2</sup> )	22,820.82	68,386.69	0	360,004.08	
	평균표고 Average elevation (m)	70.42	92.59	20.00	665.00	
	경사도 Slope (°)	5.71	7.16	0	36.96	
물리적 환경 Three-dimensional built environment	건축면적 Building area (m <sup>2</sup> )	42,137.74	41,301.17	0	77,575,580.20	
	연면적 Total floor area (m <sup>2</sup> )	Total	218.39	207.32	0	1389.61
		용적률 Floor area ratio (%)	Low	45.91	36.20	0
	Three-dimensional built environment	Medium	223.82	71.67	115.14	519.19
		High	897.4	277.93	538.35	1389.61
		Total	0.8613	0.0753	0.6829	0.9999
	친공 개폐율 Sky view factor	Low	0.7681	0.0323	0.6829	0.8174
		Medium	0.8621	0.0258	0.8175	0.9076
		High	0.9522	0.0274	0.9078	0.9999
	표면 거칠기 Surface roughness	Total	17.6853	13.7610	0.0316	81.1186
Low		9.6446	4.2296	0.0316	17.2910	
Medium		24.9621	5.7583	17.3019	37.6730	
High	50.7348	9.5061	37.9326	81.1186		
	교통환경 Transport environment	철도시설밀도 Railway density (km/km <sup>2</sup> )	530.98	2711.10	0	36,085.95
		도로시설 밀도 Road density (km/km <sup>2</sup> )	4,789.02	4,412.37	0	21,325.96
교통량 Traffic volume (unit quantity/h)	27,189.51	38,030.86	0	365,267		

\* The average floor area ratio (FAR), average sky view factor (SVF) and average surface roughness (SR) were classified into three levels using Natural Breaks (Jenks) of ArcGIS: average FAR Low(<115%), Medium(115%-538%), High(>538%); average SVF Low(<0.8), Medium(0.8-0.9), High(>0.9); average SR Low(<17.3), Medium(17.3-37.9), High(>37.9).

표 3. OLS와 공간통계모형 분석 결과 Table 3. Analysis results of OLS and spatial statistics models

변수 Variable		다중회귀모형 OLS		공간시차모형 Spatial Lag Model		공간오차모형 Spatial Error Model	
		Coef.	t	Coef.	z	Coef.	z
자연환경 Natural environment	녹지면적 Green area	-2.8E-06***	-6.24	-2.7E-06***	-7.90	-3.8E-06***	-2.28
	하천면적 River area	-2.9E-05***	-42.31	-2.1E-05***	-36.20	-2.3E-05***	4.94
	평균표고 Average elevation	-2.7E-03***	-3.11	1.6E-03**	2.42	-4.6E-03***	18.39
	경사도 Slope	-6.7E-02***	-4.72	-2.6E-02**	-2.45	-3.0E-02**	4.62
물리적 환경 Three-dimensional built environment	건축면적 Building area	4.4E-06**	2.05	5.6E-06***	3.47	1.1E-05***	6.22
	연면적 Total floor area	1.1E-06***	4.33	6.8E-08	0.37	1.3E-07	0.65
	천공 개폐율 Sky view factor	3.805***	3.24	4.428***	5.01	6.335***	5.41
	표면 거칠기 Surface roughness	-0.045***	-7.61	-0.029***	-6.49	-0.017***	-3.70
교통환경 Transport environment	철도시설밀도 Railway density	-2.8E-06***	5.92	4.9E-05***	4.60	5.4E-05***	-8.73
	도로시설 밀도 Road density	-2.9E-05***	19.58	2.7E-04***	17.16	3.5E-04***	-32.24
	교통량 Traffic volume	8.3E-05**	4.06	6.2E-06***	7.33	4.1E-06***	-3.57
공간시차계수 Spatial lag (Rho)		-	-	0.555***	37.92	-	-
공간오차계수 Spatial error (Lamda)		-	-	-	-	0.865***	60.79
Constant		30.025***	26.04	10.593***	10.77	27.255***	23.91
Summary Statistics	No. obs.	1,839		1,839		1,839	
	R-squared	0.834		0.905		0.918	
	Log likelihood	-3474.8		-3007.2		-2974.7	
	AIC	6973.6		6040.4		5973.4	
	SC	7039.8		6112.1		6039.6	
	Likelihood ratio test	-		935.233***		1000.270***	
	Residual's Moran's I	0.422***		0.164***		-0.00023	

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

녹지 및 하천의 표면은 태양 복사에너지가 쉽게 축적되지 않기 때문에 지표온도가 낮게 나타났다고 볼 수 있다. 한편 평균 고도가 증가하게 되면 대기온도가 감소하게 되며, 이러한 온도 감소는 지표온도에 영향을 미치게 된다. 또한, 경사의 방향에 따라 달라질 수 있지만 대체적으로 경사가 증가하면 지표에 도달하는 태양 에너지가 감소하게 되고 지형에 의한 음영효과가 생기기 때문에 지표 온도와 음(-)의 관계를 갖는 것으로 분석된다.

셋째, 대부분의 물리적 환경 변수는 지표온도와 통계적으로 유의한 관계를 나타내었다. 우선, 건축면적, 도로시설 밀도 그리고 철도시설 밀도는 지표온도와 양(+)의 관계를 맺는 것으로 나타났

다. 물리적 환경 변수들은 도시화의 결과물로서 이들 변수는 지표의 알베도를 낮추어, 지표로 도달하는 태양 에너지의 흡수량을 증가시켜 지표 온도를 상승시키게 된다. 반면 공간오차모형의 경우 건축면적은 통계적으로 유의하였으나, 건축물 연면적은 지표 온도와 통계적으로 유의한 관계를 보이지 않았다. 이는 건축물 연면적 변수가 다른 3차원 물리적 환경변수인 천공개폐율이나 표면거칠기 변수와 상호작용효과를 가지고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 용적률 수준을 고려한 상호작용효과를 모형에서 다시 살펴볼 필요가 있다.

넷째, 3차원 물리 환경 요소인 천공개폐율과 표면 거칠기의 분

표 4. 용적률 상호작용변수 Table 4. Floor area ratio (FAR) interaction variables

평균 용적률×평균 천공개폐율 Average floor area ratio×Average sky view factor (600m×600m grid cell)		천공개폐율(SVF) 수준 Sky View Factor (SVF) level		
		Low(<0.8)	Medium(0.8-0.9)	High(>0.9)
용적률 Floor area ratio	Low(<115)	Low-Low(LL)	Low-Medium(LM)	Low-High(LH)
	Medium(115-538)	Medium-Low(ML)	Medium-Medium(MM)	Medium-High(MH)
	High(>538)	High-Low(HL)	High-Medium(HM)	High-High(HH)
평균 용적률×평균 표면 거칠기 Average floor area ratio×Average surface roughness (600m×600m grid cell)		표면거칠기(SR) 수준 Surface Roughness (SR) level		
		Low(<17.3)	Medium(17.3-37.9)	High(>37.9)
용적률 Floor area ratio	Low(<115)	Low-Low(LL)	Low-Medium(LM)	Low-High(LH)
	Medium(115-538)	Medium-Low(ML)	Medium-Medium(MM)	Medium-High(MH)
	High(>538)	High-Low(HL)	High-Medium(HM)	High-High(HH)

석 결과, 천공개폐율과 지표온도는 양(+)의 관계를 보였다. 이는 천공개폐율 값이 클수록 개방성이 높아 태양의 직사광선이 지표 온도에 직접적인 영향을 미치는 것을 의미한다. 반면 표면거칠기와 지표온도는 음(-)의 관계를 나타내었는데, 표면거칠기가 클수록 건물이나 지표면에 의한 음영효과로 인해 지표온도가 상대적으로 낮아지는 것으로 해석할 수 있다.

그러나 이러한 분석의 결과는 3차원 물리적 환경 변수 사이의 상호작용 효과를 설명하는 데 한계가 있다. 특히, 입체적인 도시의 물리적 환경을 설명하기 위해 분석에 사용된 변수인 천공개폐율(SVF)과 표면거칠기(SR)는 단일 건물의 볼륨(Volume)을 결정하는 주요 요소인 용적률과 밀접한 상호 작용을 하고 있기 때문이다. 따라서 3차원 물리적 환경요소인 용적률, 천공개폐율, 표면거칠기를 상-중-하 수준으로 분류하여 상호작용 변수를 도출하였다(표 2 참조). 분류기법은 Natural Breaks(Jenks)를 적용하였다. Natural Breaks 방법은 비슷한 표본들을 한 집단으로 고려하는 것을 원칙으로 분산의 합계가 가장 적을 때 최적의 분류 결과를 나타내는 분류 방법으로 일반적으로 활용되고 있는 기법이다.

〈표 4〉는 용적률과 천공개폐율 그리고 거칠기를 세 개의 수준으로 분류한 후 상호작용변수를 각각 9개 그룹으로 분류하였다. 분석모형에서 준거 변수는 MM(중간수준 용적률×중간수준 SVF 또는 SR)를 사용하였다. 용적률 상호작용변수를 고려한 공간오차모형의 결과는 〈표 5〉와 같다. 공간오차모형(SEM)이 공간적 자기 상관을 완전히 제거하고 모형의 적합도가 가장 높은 것으로 나타났다. 공간적자기상관 변수인 공간오차계수(Lambda)는 통계적으로 매우 유의하고 잔차의 Moran's I값은 유의하지 않아 공간적 자기 상관이 제어된 것을 의미하며, 주요 분석결과는 다음과 같다.

첫째, 천공 개폐율의 경우 중간수준의 용적률과 중간수준의 천공개폐율인 경우(MM)와 비교할 때 중간수준의 용적률과 상위수준 천공개폐율의 경우(MH)와 두 지표 모두가 높은 경우(HH)에

서 지표온도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 그리고 용적률이 낮고 천공개폐율이 중간수준인 경우(LM)에는 지표온도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 용적률의 수준을 제어할 때 SVF의 증가는 일사량의 증가로 인해 지표온도를 높이는 역할을 하는 것으로 볼 수 있다. 천공개폐율이 높은 경우 공기의 흐름이나 통풍으로 인한 지표온도 감소 효과보다는 태양의 직사광선을 많이 받기 때문에 지표온도 상승에 직접적인 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.

둘째, 표면거칠기의 경우 용적률과 표면거칠기가 각각 중간수준인 경우(MM)와 비교할 때, 중간수준 용적률과 하위수준 표면거칠기의 경우(ML)와 상위수준 용적률과 하위수준 표면거칠기 경우(HL)에 지표온도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 특히 용적률이 높고 표면거칠기가 낮은 수준(HL)에서 매우 유의하게 나타났으며, 반대로 용적률이 낮고 표면거칠기가 중간수준인 경우(LM)에 지표온도가 상대적으로 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면, 표면거칠기가 하위수준인 경우 지표 온도가 높게 나타났다. 이러한 결과는 일반적으로 표면거칠기가 낮을수록 건물의 음영 효과가 저감되기 때문에 지표온도 상승에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 그러나 이러한 표면거칠기의 영향은 용적률의 수준에 따라 상호작용효과가 다르게 나타났다. 이는 표면거칠기는 용적률의 수준에 따라 지표온도에 다르게 영향을 미치는 것을 의미한다.

## V. 결론

본 연구는 도시환경, 특히 도시의 3차원 물리적 환경이 지표온도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 종속변수인 지표온도는 LANDSAT 8 위성영상 데이터 및 열적외선 밴드를 기반으로 산출하였으며, 지표온도에 영향을 미치는 변수로는 자연환경 부문, 3차원 물리적 환경 부문, 교통 부분으로 나누어 분석하였

표 5. 상호작용 변수를 고려한 공간오차모형 분석 결과 Table 5. Spatial error model analysis with interaction variables

변수 Variable	공간 오차 모델(용적률×SVF 상호작용 효과) Spatial Error Model (FAR×SVF interaction effect)		공간 오차 모델(용적률×SR 상호작용 효과) Spatial Error Model (FAR×SR interaction effect)		
	Coef.	z	Coef.	z	
자연환경 Natural environment	녹지면적 Green area	-3.6E-06***	-8.36	-3.9E-06***	-9.12
	하천면적 River area	-2.3E-05***	-32.05	-2.3E-05***	-32.24
	평균표고 Average elevation	-5.0E-03***	-3.85	-4.8E-03***	-3.76
	경사도 Slope	-2.1E-02	-1.62	-2.7E-02**	-2.09
물리적 환경 Three-dimensional built environment	건축면적 Building area	1.0E-05***	6.06	8.8E-06***	5.13
	연면적 Total floor area	4.1E-07**	2.04	4.4E-07**	2.19
	천공 개폐율 Sky view factor	4.906***	3.42	5.898***	5.12
	표면 거칠기 Surface roughness	-0.016***	-3.63	-0.010	-1.61
교통환경 Transport environment	철도시설밀도 Railway density	5.4E-05***	5.03	4.7E-05***	4.37
	도로시설 밀도 Road density	3.3E-04***	17.41	3.2E-04***	17.14
	교통량 Traffic volume	4.0E-06***	4.60	3.4E-06***	3.97
상호작용변수† Interaction variable† FAR×SVF (or SR)	LL	0.063	0.36	0.153	1.04
	LM	-0.334***	-2.99	-0.227*	-1.72
	LH	0.172	1.17	0.112	0.56
	ML	0.154	1.00	0.484***	3.39
	MH	0.316*	1.94	-0.399	-1.00
	HL	0.096	0.63	0.645***	4.49
	HM	0.078	0.74	0.075	0.55
	HH	0.575***	3.99	-0.002	-0.01
공간오차계수 Spatial error (Lamda)	0.865***	60.99	0.870***	62.72	
Constant	28.391***	21.16	27.394***	24.27	
Summary Statistics	No. obs.	1,839		1,839	
	R-squared	0.921		0.922	
	Log likelihood	-2947.9		-2940.6	
	AIC	5935.8		5921.1	
	SC	6046.1		6031.5	
	Likelihood ratio test	998.219***		1029.983***	
	Residual's Moran's I	-0.00269		-0.00115	

The reference group of interaction variable is MM. This means a medium level of FAR and a medium level of SVF (or SR).  
\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

다. 나아가 천공개폐율과 표면거칠기 변수를 용적률과 상호작용 변수로 구축하여 용적률을 제어한 상태에서 천공개폐율과 표면 거칠기가 지표온도에 미치는 영향을 분석하였다. 한편, 종속변수 인 지표온도의 공간적 자기상관을 제어하기 위해 최종모형은 공

간오차모형을 활용하였다.

분석결과는 다음과 같다. 첫째, 지표온도는 공간적 자기상관이 매우 높아 일반 다중 선형회귀모형(OLS)보다 공간회귀모형이 적합한 것으로 나타났다. 특히 공간시차모형보다 공간오차모형의

적합도가 더 높은 것으로 나타났다.

둘째, 자연환경요소인 녹지면적과 하천면적 모두 지표온도를 저감시키는 것으로 나타났으며, 공원보다 하천 주변에서의 지표온도가 더 낮은 것으로 나타났다. 따라서 공원 및 하천을 활용한 지표온도 저감대책이 필요하다. 그밖에 평균 표고와 경사도가 높은 곳이 그렇지 않은 곳보다 지표온도가 낮게 나타났다. 표고나 경사가 높은 지역의 경우 미개발지역을 많이 포함하고 있기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 또한, 표고가 높은 경우 기온이 낮아지고 경사가 큰 지역의 경우 평지와 비교할 때 태양 복사에너지의 유입량에 차이가 나기 때문으로 판단된다.

셋째, 도시환경특성 변수는 지표온도와 밀접한 관련을 맺고 있는 것으로 나타났다. 물리적 환경변수인 건축면적이 증가할수록 지표온도가 높은 것으로 나타났으며, 건축면적과 비교하여 그 영향력은 크지 않았으나 연면적 역시 지표온도와 양(+)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 교통부문 요소인 도로시설 밀도와 철도시설 밀도의 경우에도 지표온도와 양의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 도로시설 밀도의 증가는 불투수 면의 증가와 교통량의 증가를 통해 지표온도에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 이와 더불어 철로 노선의 주재료인 강철은 재료적 특성으로 인해 태양의 열에너지를 흡수하여 지표온도의 상승에 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다.

넷째, 도시의 3차원 물리적 환경변수는 도시 지표온도와 밀접한 관계를 맺는 것으로 나타났다. 우선 천공개폐율과 지표온도는 양(+)의 관계를 가지는 것으로 확인하였다. 이때, 천공개폐율이 높다는 것은 하늘 방향으로의 개방 정도가 높음을 의미하며, 이는 지표면에 도달하는 태양 복사에너지가 많아 지표온도의 상승으로 이어진다고 볼 수 있다. 반면에 표면거칠기의 경우 지표온도와 음(-)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 표면거칠기가 높을수록 지표면이 평탄하지 않음을 의미하고, 지형이나 건물에 의한 그림자가 많이 생성되어 지표온도를 줄이는 것으로 볼 수 있다.

다섯째, 용적률과 상호작용변수인 천공개폐율과 표면거칠기를 활용한 모형에서도 흥미로운 결과가 나타났다. 우선 용적률과 천공개폐율 상호작용변수를 고려할 때 용적률과 천공개폐율이 각각 중간수준인 MM 유형보다 용적률은 중간수준이고 천공개폐율이 상위수준인 MH 유형, 용적률과 천공개폐율 모두 높은 HH 유형에서 지표온도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 특히, 용적률과 천공개폐율이 상위수준인 HH 유형에서 지표온도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 용적률이 하위수준이고, 천공개폐율이 중간수준인 LM 유형의 경우 지표온도가 상대적으로 가장 낮은 것으로 나타났다. 따라서 용적률이 하위수준에 속하고 천공개폐율이 중간수준인 LM 유형이 지표온도 저감 측면에서 유리하다고 볼 수 있다. 천공개폐율이 높은 경우 직접 도달하는 태양 복사열이 많기 때문에 지표온도가 높게 나타났으며, 천공개폐율이 너무 낮은 경우 건물의 밀집으로 인해 대기의 순환을 방해하여 지표

온도 감소 효과가 낮은 것으로 볼 수 있다.

용적률과 표면거칠기를 함께 고려한 상호작용 모형에서는 용적률과 표면거칠기가 각각 중간수준인 MM 유형보다 용적률이 중간수준이고 표면거칠기가 하위수준인 ML 유형에서 지표온도가 높은 것으로 나타났다. 특히, 용적률이 높고 표면거칠기가 낮은 HL 유형에서 지표온도가 가장 높게 나타났으며, 용적률이 낮고 표면 거칠기가 중간인 LM 유형에서 지표온도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 표면거칠기가 낮은 평탄한 지역일수록 건물의 높이 차이에 의한 음영효과가 감소하기 때문에 상대적으로 높은 지표온도가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

본 연구를 통해 다음과 같은 정책적 시사점을 도출하였다. 첫째, 도시공간의 지표온도를 줄이고 도시 열섬현상을 개선하기 위하여 녹지 및 수공간의 점진적 확대가 필요하다. 녹지와 수공간의 확대는 지표온도를 저감하여 도시의 열섬현상 완화에 기여할 수 있다.

둘째, 철도시설밀도, 도로시설 밀도, 교통량 등은 높은 지표온도와 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 태양의 직사광선에 노출된 지상의 철도시설이나 도로시설의 경우 부분적으로 녹화나 포장재료의 알베도 조정을 통해 지표온도의 상승을 완화하거나 장기적으로 면적을 줄여나가는 방안이 필요하다. 또한, 교통량의 경우 열 발생을 통해 지표온도에 영향을 미치는 요인임을 확인하였다. 따라서 자가용 교통량을 줄이는 정책은 화석연료와 미세먼지 완화 효과뿐만 아니라 지표온도를 낮추어 도시의 열 환경 개선에도 영향을 미칠 수 있음을 보였다.

마지막으로, 3차원 물리적 환경변수의 상호작용효과 분석은 도시계획 및 설계에 중요한 정책적 시사점을 가지고 있다. 도시공간에서 천공개폐율과 표면거칠기는 용적률의 수준에 따라서 지표온도에 영향을 미칠 수 있는 중요한 변수로 확인하였다. 천공개폐율이 높을수록 지표온도는 높게 나타났으며, 용적률과의 상호작용효과도 대체적으로 중간수준 이상의 용적률에서 천공개폐율이 높을수록 지표온도가 높게 나타났다. 이러한 결과는 천공개폐율의 증가가 공기의 흐름과 통풍을 좋게 하여 지표온도 저감에 영향을 미칠 수 있지만 직접적으로 들어오는 일사량이 지표온도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 표면거칠기도 건물의 음영효과와 통풍효과를 통해 지표온도에 영향을 미치는 요소이다. 표면거칠기가 높을수록 지표온도는 낮게 나타나 표면거칠기로 인한 통풍효과보다는 건물의 음영효과가 지표온도에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

용적률과의 상호작용효과에서도 대체로 중간수준 이상의 용적률에서 표면거칠기가 낮을수록 지표온도가 높게 나타났다. 그러나 낮은 수준의 용적률에서 표면거칠기의 효과는 유의하지 않았다. 이러한 결과는 천공개폐율과 마찬가지로 표면거칠기도 공기의 흐름이나 통풍효과 보다는 음영효과에 의해 지표온도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

결론적으로 본 연구는 도시공간의 열환경 개선과 지표온도 저감과 관련하여 용적률과 상호작용 효과를 고려한 천공개폐율과 표면거칠기 수준을 결정할 필요가 있음을 보였다. 예를 들어 단지개발이나 유동인구가 많은 상업가로 개발에 있어 용적률이 높아질수록 태양의 일사량이 건물의 음영효과에 의해 감소할 수 있도록 천공개폐율을 낮추어주고 건물의 층수를 다양하게 하여 표면거칠기를 높여주는 것이 지표온도를 낮추기 위한 바람직한 방향으로 볼 수 있다.

본 연구는 지표온도에 영향을 미치는 자연환경 부문, 물리적 환경 부문, 교통부문을 종합적으로 고려하였고, 3차원 물리적 환경변수와 용적률과의 상호작용효과를 분석하였다는 점에서 의의가 있다. 그럼에도 불구하고 다음과 같은 몇 가지 연구의 한계를 가지고 있다.

첫째, 종속변수로 사용한 LANDSAT 8 위성영상의 경우 한국 시각으로 2016년 5월 19일 오전 11시 20분에 촬영된 사진이다. 지표온도를 분석하는데 충분한 공간적인 분산도(variation)를 가지고 있지만 지표온도가 가장 높은 오후 시간대 영상이 더 타당할 수 있다. 그러나 현재 USGS(U.S. Geological Survey)에서는 한반도 지역의 경우 오전 시간대 외 다른 시간대 자료를 제공하고 있지 않다. 따라서 한반도를 대상으로 오후 시간대 영상을 제공하는 MODIS나 ASTER 영상을 활용하여 분석할 필요가 있다.

둘째, 도시의 지표온도에 영향을 미치는 3차원 물리적 환경인 천공개폐율과 표면거칠기 변수를 용적률과의 상호작용까지 고려하였다는 점에서 의의가 있으나, 상호작용 효과의 실증을 위해 지표의 수준을 3단계(상, 중, 하)로 단순화하여 분석하였다는 점에서 한계를 가지고 있다. 또한, 용적률, 천공개폐율, 표면거칠기를 포함한 주요 독립변수 사이의 상호작용효과를 모두 검증하지는 못하였다. 향후 연구에서는 이러한 상호작용효과를 분석하여 구체적으로 열 환경 개선을 위한 도시설계 지침에 활용할 수 있는 시사점의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

셋째, 본 연구는 3차원 물리적 환경변수인 용적률, 천공개폐율, 표면거칠기와 지표온도의 관계를 분석하였다. 만약 지표온도에서 나아가 대기온도를 분석할 경우 공기의 흐름이나 통풍에 영향을 미치는 3차원 물리적 환경 변수의 효과가 다르게 나타날 수 있다. 향후 연구는 이러한 3차원 물리적 환경변수가 지표온도와 대기온도에 미치는 영향과 지표온도가 궁극적으로 대기온도에 미치는 매개효과에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

마지막으로, 도시공간의 지표온도에 영향을 미치는 요인은 매우 다양하다. 건축물과 교통량 변수를 통해 인공열의 영향을 어느 정도 제어하였다고 판단되지만, 지표온도에 영향을 미칠 수 있는 인공열의 배출을 모두 제어하는데 한계를 가지고 있다. 예를 들어, 위성영상을 활용하여 종속 변수인 지표온도를 추출하기 위해 지표온도에 직접적인 영향을 미치는 태양 일사량과 반사율(알베도)변수가 사용되어 중복성 문제로 최종모형의 독립변수에

포함하지 못하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대규모 지역을 대상으로 하는 위성영상자료보다 소규모 지역을 대상으로 열화상 카메라를 활용한 지표온도 분석을 시도할 경우 태양 일사량과 반사율 변수를 모형에 고려할 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 이러한 연구의 한계점을 고려하여 좀 더 정밀한 수준에서 3차원 물리적 환경이 지표온도에 미치는 상호작용 효과를 분석하고 열 환경 개선을 위한 도시계획 및 도시설계에 반영할 수 있는 구체적인 시사점을 도출할 필요가 있다.

## 인용문헌 References

- 김미경·김상필·김남훈·송홍규, 2014. "LANDSAT 영상을 이용한 세종특별자치시의 도시화와 열섬현상 분석", 「대한토목학회 논문집」, 34(3): 1033-1041.  
Kim, M.K., Kim, S.P., Kim, N.H., and Sohn, 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.
- 김수봉·김기호·조진희, 2001. "도시열섬현상의 원인과 대책", 「환경과학논집」, 6: 63-89.  
Kim, S.B., Kim, G.H., and Cho, J.H., 2001. "The Urban Heat Island Phenomenon and Potential Mitigation Strategies", *Journal of Nakdong River Environmental Research Institute*, 6: 63-89.
- 김태현·이원희·한유경, 2018. "Landsat-8 시계열 위성영상을 활용한 도시심지 확장에 따른 열섬포텐셜 분석", 「한국측량학회지」, 36(4): 305-316.  
Kim, T.H., Lee, W.H., and 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.
- 변필성, 2009. "알기 쉬운 연구방법론", 「국토」, 안양: 국토연구원.  
Byun, P.H., 2009. "Easy to Learn Research Methodology", *Planning and Policy*, Anyang: Korea Research Institute for Human Settlements.
- 엄대용, 2006. "원격탐사 자료에 의한 지표온도추출 정확도 향상에 관한 연구", 「한국지리정보학회지」, 9(2): 159-171.  
Um, D.Y., 2006. "A Study on the Accuracy Improvement of Land Surface Temperature Extraction by Remote Sensing Data", *Journal of Korean Geographic Information System*, 9(2): 159-171.
- 윤근원·박정호·채기주·박종현, 2003. "한반도지역 LANDSAT 위성영상의 기하보정 데이터 구축", 「한국지리정보학회지」, 6(1): 98-106.  
Yoon, G.W., Park, J.H., Chae, G.J., and Park, J.H., 2003. "Establishment of Geometric Correction Data Using LANDSAT Satellite Images over the Korean Peninsular", *Journal of Korean Geographic Information System*, 6(1): 98-106.
- 윤희정, 2013. "어메니티자원의 공간분포와 공간자기상관성", 「관광학연구」, 37(2): 31-53.  
Yoon, H.J., 2013. "Spatial Distribution and Spatial Autocorrelation on Amenity Resources", *Journal of Tourism Sciences*, 37(2): 31-53.

8. 이희연·노승철, 2013. 「고급통계분석론-이론과 실습-」, 서울: 문우사.  
Lee, H.Y. and Noh, S.C., 2013. *Advanced Statistical Analysis: Theory and Practice*, Seoul: Moonwoosa.
9. 장윤정·이승일, 2009. "서울의 창조산업 분포특성과 도시상업활력의 공간회귀분석", 「국토계획」, 44(6): 51-64.  
Jang, Y.J. and Lee, S.I., 2009. "Spatial Regression Analysis between Creative Industry and Commercial Activity Index for Seoul", *Journal of Korea Planning Association*, 44(6): 51-64.
10. 조성모·윤용환·류을렬·박봉주·김원태, 2009. "도시내 용도지역의 토지피복형태가 열섬현상에 미치는 영향", 「한국환경과학회지」, 18(2): 169-176.  
Cho, S.M., Yoon, Y.H., Ryu, E.R., Park, B.J., and Kim, W.T., 2009. "The Influence of Land Cover and Zoning on the Urban Heat Island in Cheongju", *Journal of Environmental Science International*, 18(2): 169-176.
11. 조혜진·임지현, 2011. "도시도로 녹지의 도로 표면온도 저감 효과에 관한 연구", 「한국조경학회지」, 39(3): 107-116.  
Cho, H.J. and Lim, J.H., 2011. "The Effect of Urban Road Vegetation on a Decrease of Road Surface Temperature", *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 39(3): 107-116.
12. Anselin, L., 1988. *Spatial Econometrics: Methods and Models*, Dordrecht, Zuid, Holland: Kluwer Academic Publishers.
13. Anselin, L., 1995. "Local Indicators of Spatial Association-LISA", *Geographical Analysis*, 27: 93-115.
14. Anselin, L., 2005. *Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook*, University of Illinois, Chicago: Urbana-Champaign.
15. Barsi, J.A., Schott, J.R., Palluconi, F.D., and Hook, S.J., 2005. "Validation of a Web-based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments", *Earth Observing Systems X, Proceedings of SPIE*, 5882: 58820E. International Society for Optics and Photonics.
16. Chen, X.L., Zhao, H.M., Li, P.X., and Yin, Z.Y., 2006. "Remote Sensing Image-based Analysis of the Relationship between Urban Heat Island and Land Use/Cover Changes", *Remote Sensing of Environment*, 104(2): 133-146.
17. Doulos, L., Santamouris, M., and Livada, I., 2004. "Passive Cooling of Outdoor Urban Spaces. The Role of Materials", *Solar Energy*, 77(2): 231-249.
18. Gál, T., Lindberg, F., and Unger, J., 2009. "Computing Continuous Sky View Factors Using 3D Urban Raster and Vector Databases: Comparison and Application to Urban Climate", *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1-2): 111-123.
19. Gál, T. and Unger, J., 2009. "Detection of Ventilation Paths Using High-resolution Roughness Parameter Mapping in a Large Urban Area", *Building and Environment*, 44(1): 198-206.
20. Georgakis, C. and Santamouris, M., 2006. "Experimental Investigation of Air Flow and Temperature Distribution in Deep Urban Canyons for Natural Ventilation Purposes", *Energy and Buildings*, 38(4): 367-376.
21. Giridharan, R., Ganesan, S., and Lau, S.S.Y., 2004. "Day-time Urban Heat Island Effect in High-rise and High-density Residential Developments in Hong Kong", *Energy and Buildings*, 36(6): 525-534.
22. Giridharan, R., Lau, S.S.Y., Ganesan, S., and Givoni, B., 2007. "Urban Design Factors Influencing Heat Island Intensity in High-rise High-density Environments of Hong Kong", *Building and Environment*, 42(10): 3669-3684.
23. Grimmond, S., 2007. "Urbanization and Global Environmental Change: Local Effects of Urban Warming", *The Geographical Journal*, 173(1): 83-88.
24. Kokalj, Ž., Zakšek, K., and Oštir, K., 2011. "Application of 3ky-view Factor for the Visualisation of Historic Landscape Features in Lidar-derived Relief Models", *Antiquity*, 85(327): 263-273.
25. Kokalj, Ž., Zakšek, K., and Oštir, K., 2013. "Visualizations of Lidar Derived Relief Models", in Rachel S. Opitz, David Cowley(eds.), *Interpreting Archaeological Topography: Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*, Oxbow, Oxford, United Kingdom: Oxbow Books, pp. 100-114.
26. Landsberg, H.E., 1979. "Atmospheric Changes in a Growing Community (the Columbia, Maryland Experience)", *Urban Ecology*, 4(1): 53-81.
27. Memon, R.A., Leung, D.Y., and Liu, C.H., 2010. "Effects of Building Aspect Ratio and Wind Speed on Air Temperatures in Urban-like Street Canyons", *Building and Environment*, 45(1): 176-188.
28. Niachou, K., Livada, I., and Santamouris, M., 2008. "Experimental Study of Temperature and Airflow Distribution Inside an Urban Street Canyon during Hot Summer Weather Condition Part II: Airflow Analysis", *Building and Environment*, 43(8): 1393-1403.
29. Oke, T.R., 1981. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations", *Journal of Climatology*, 1(3): 237-254.
30. Oke, T.R., 1982. "The Energetic Basis of the Urban Heat Island", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1-24.
31. Oliveira, S., Andrade, H., and Vaz, T., 2011. "The Cooling Effect of Green Spaces as a Contribution to the Mitigation of Urban Heat: A Case Study in Lisbon", *Building and Environment*, 46(11): 2186-2194.
32. Priyadarsini, R., Hien, W.N., and David, C.K.W., 2008. "Microclimatic Modeling of the Urban Thermal Environment of Singapore to Mitigate Urban Heat Island", *Solar Energy*, 82(8): 727-745.
33. Suga, Y., Ogawa, H., Ohno, K., and Yamada, K., 2003. "Detection of Surface Temperature from Landsat-7/ETM+", *Advances in Space Research*, 32(11): 2235-2240.
34. Susca, T., Gaffin, S.R., and Dell'Osso, G.R., 2011. "Positive Effects of Vegetation: Urban Heat Island and Green Roofs", *Environmental Pollution*, 159(8-9): 2119-2126.
35. Tobler, W.R., 1970. "A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region", *Economic Geography*, 46(sup. 1): 234-240.

36. Wang, Y. and Akbari, H., 2014. "Effect of Sky View Factor on Outdoor Temperature and Comfort in Montreal", *Environmental Engineering Science*, 31(6): 272-287.
37. Wang, Y. and Akbari, H., 2016, "The Effects of Street Tree Planting on Urban Heat Island Mitigation in Montreal", *Sustainable Cities and Society*, 27: 122-128.
38. Wang, X., Cheng, H., Xi, J., Yang, G., and Zhao, Y., 2018. "Relationship between Park Composition, Vegetation Characteristics and Cool Island Effect", *Sustainability*, 10(3): 587.
39. Wong, M.S., Nichol, J.E., To, P.H., and Wang, J., 2010. "A Simple Method for Designation of Urban Ventilation Corridors and Its Application to Urban Heat Island Analysis", *Building and Environment*, 45(8): 1880-1889.
40. Zakšek, K., Oštir, K., and Kokalj, Ž., 2011. "Sky-view Factor as a Relief Visualization Technique", *Remote Sensing*, 3(2): 398-415.
41. Zhang, Y.J., Yang, J.M., and Chen, W., 2002. "The Methods for Extraction of the Alteration Remote Sensing Anomaly from Etm+ (Tm) Data and Their Application: Geological Basis and Spectral Precondition", *Journal of Remote Sensing for Land & Resources*, 4: 30-36.
42. The Center for Spatial Data Science of the University of Chicago, "GeoDa official website", Accessed March 07, 2018. <https://spatial.uchicago.edu/content/about>
43. National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Atmospheric Correction Parameter Calculator", Accessed November 15, 2017. <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>
44. U.S. Geological Survey (USGS), 2017, "Using the USGS Landsat 8 product", Accessed November 15, 2017. [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)

Date Received	2018-07-25
Reviewed(1 <sup>st</sup> )	2018-09-10
Date Revised	2018-10-22
Reviewed(2 <sup>nd</sup> )	2018-11-06
Date Accepted	2018-11-06
Final Received	2019-02-12