

## 지표면 도시열섬강도의 시공간적 분포와 영향을 주는 변수 분석\*

- 국내 30개 도시를 대상으로 -

### Analyzing the Diurnal and Spatial Variation of Surface Urban Heat Island Intensity Distribution

- Focused on 30 cities in Korea -

박채연\*\* · 이동근\*\*\* · 성선용\*\*\*\* · 박종훈\*\*\*\*\* · 정승규\*

Park, Chaeyeon · Lee, Dong Kun · Sung, Sunyong · Park, Jonghoon · Jeong, Seunggyu

#### Abstract

The urban heat island (UHI) phenomenon is mainly caused by urbanization and adversely affects humans and the environment. Since the spatial and temporal distribution of urban heat islands (UHIs) are irregular, effective mitigation of the effect of UHIs requires an understanding of these distribution in terms of the surface urban heat island intensity (SUHI). In this work, we calculated the day and night SUHI values in 30 cities of South Korea using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data collected during the summer (June to August) from 2010 to 2015. Correlation analysis was performed to analyze the variables affecting SUHI. Multi-regression analysis based on the correlation analysis was performed to select significant predictors of SUHI for daytime and nighttime. The daytime SUHI, which was affected by precipitation, was found to be higher than the nighttime SUHI, which was affected by the average temperature. However, both were thought to be affected by the albedo, population density, and distance from the sea. These results can be used to suggest various strategies for an effective UHI mitigation.

*키 워 드* ▪ 도시화, 지표면온도, 공간적 분포, 알베도, 바다로부터의 거리, 식생 활력도, 기후 영향  
*Keywords* ▪ Urbanization, Land surface temperature, spatial distribution, Albedo, distance from the sea, vegetation index, climate effects

#### I. 서론

급속한 도시화로 인하여 도시 온도는 지구 평균 기온의 변화보다 더욱 빠르게 변화하였다(Grimm et al., 2008). 특히 도심 지역은 주변 지역보다 열을 발생시키고 보존하여 더 높은 온도를 갖게 되었고

이러한 현상을 도시열섬현상이라고 한다. 도시열섬 현상은 순 일차 생산량과 생물다양성을 감소시키는 등 환경적으로도 부정적인 영향을 끼칠 뿐만 아니라(Grimm et al., 2008; Imhoff et al., 2010), 냉방의 수요를 높이고 도시민의 폭력성과 온열 질환 비율을 높이는 등 인간에게도 부정적인 영향을 끼친

\* 본 연구는 국토교통부 도시건축연구개발사업의 연구비지원(15AUDP-B102406-01)에 의해 수행되었습니다.

\*\* Graduate School, Seoul National University (First author: chaeyeon528@snu.ac.kr)

\*\*\* Department of Landscape Architecture and Rural system Engineering, Seoul National University (Corresponding author: dklee7@snu.ac.kr)

\*\*\*\* Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University (white109@snu.ac.kr)

\*\*\*\*\* Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University (hoon73@snu.ac.kr)

\* Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University (skyuno@snu.ac.kr)

다(Santamouris et al., 2001; O'Loughlin et al., 2012). 이러한 영향은 기후변화로 인하여 더욱 심각해질 것으로 예상된다(Lin et al., 2015). 따라서 도시열섬현상의 완화는 도시계획상에서 고려되어야 하며 열섬이 발생하는 지역의 공간적 특징에 대한 이해가 요구되고 있다(Wang et al., 2015).

아직까지 많은 연구자들이 도시열섬현상을 연구할 때 도시의 온도 값을 이용하기 때문에 도시열섬현상을 정량적으로 분석하는 데 한계를 가지고 있다. 따라서 도시열섬현상을 측정해줄 수 있는 도시열섬강도(Urban Heat Island Intensity, UHII)에 대한 연구가 필요하다. UHII는 도시에 위치한 기상 측정값과 주변 지역에 위치한 기상측정값의 차이 값으로 나타내진다(Fujibe, 2009). 하지만 기상측정을 할 수 있는 관측소의 분포밀도가 낮고 지역적인 상태에 따라 그 값에 영향을 받을 수 있기 때문에 도시의 공간적 규모에서는 기상측정값을 이용하여 연구를 하기에 어려움이 있다(Wang et al., 2015). 반면에 원격탐사는 시간적, 공간적으로 지표면 온도(Land Surface Temperature, LST)에 대해 많은 정보를 파악할 수 있게 해준다(Peng et al., 2011). 위성영상의 열 밴드로부터 지표면온도를 취득할 수 있는데, 최근에는 도시와 주변지역의 지표면온도 이용하여 UHII를 측정한 지표면도시열섬강도(Surface Urban Heat Island Intensity, SUHII)에 대한 연구가 많이 진행되고 있다(Zhou et al., 2014).

SUHII는 도시 별로 다른 값을 나타내며 시간별, 계절별로 값이 변하게 된다. Wang(2015)과 Zhou(2014)는 중국의 주요 도시들에 대해서 인공열, 도시 형태, 지표면 특성에 따른 시공간적 SUHII를 분석하였으며, Debbage(2015)는 미국을 대상으로, Peng(2011)은 전 세계를 대상으로 계절별, 일별 SUHII의 특성 변화에 대해서 분석하였다(Debbage et al., 2012; Zhou et al., 2014; Wang et al., 2015). 국내의 도시열섬연구에서는 특정 도시의 LST의 시공간적 변화에 대해서는

연구되었지만(안지숙·김해동, 2006; 구해정 외, 2007; 도우곤·정우식, 2012), 도시열섬강도를 이용하여 도시간의 분포 차이를 보지는 못했다는 한계점이 있다. 국내의 도시열섬현상은 더 이상 특정 도시에 국한되는 문제가 아니며, 대부분의 도시에서 열대야와 폭염이 나타나고 있다(국민안전처, 2015). 특히 하절기에 나타나는 열대야는 점차 급증하고 있어 도시 열 환경에 큰 문제가 되고 있다(이강국·홍원화, 2007). 따라서 주간과 야간에 대해 어떤 도시가 도시열섬현상이 문제가 되고 있는지, 그 원인이 무엇인지 연구할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 원격탐사 기법을 이용하여 국내의 도시들에 대한 열섬강도의 시공간적인 분포에 대한 도시간의 차이를 파악하고 이에 영향을 주는 요인을 분석하는 것이다. 시간적으로는 주간과 야간의 차이를 보았으며, 공간적으로는 전국 30개 도시들을 비교하였다. 이는 국내 도시열섬강도에 대한 전국적인 비교를 가능하게 해주며 공간적, 시간적으로 서로 다른 원인을 파악하게 해주어, 이에 따른 도시열섬 완화 정책 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## II. 연구 범위

### 1. 공간적 범위

본 연구는 국내의 30개 도시를 대상으로 SUHII를 분석하였다. 국가통계포털(KOSIS)을 통해서 국내에서 가장 인구가 많은 도시를 기준으로 선택하였다. 위 도시들은 수도권 인근에 집중되는 특성을 가지는데, 수도권의 밀집한 도시에서는 도시외곽의 온도가 주변도시의 영향을 크게 받아 도심지의 온도와 큰 차이를 보이지 않게 되어 SUHII 분석에 어려움이 있다. 따라서 수도권에 밀집되어있는 도시 중 주변이 모두 도시로 둘러싸여 있어 외곽지역 선

정이 어려운 인천, 김포, 시흥, 화성을 제외하였다. 이 외에 제주도와 같이 섬에 위치해 바다의 영향을 크게 받는 도시를 제외한 후 나머지 30개의 도시를 연구의 대상지로 선정하였다.

기존의 도시열섬에 대한 연구에서는 행정구역단위를 이용하여 분석하는 경우가 많았다. 특히 국내에서는 서울, 대구, 부산, 광주 등에 대하여 행정구역 내에 나타나는 열섬현상의 특징을 연구했다(박석봉, 2004; 구해정 외., 2007; 도우곤·정우식, 2012; 김준식 외., 2015). 그러나 도시열섬현상은 도심지 온도가 외곽지역에 비해 높은 온도를 갖는 것을 의미하므로 도시열섬현상을 명확히 표현하기 위해서는 도심지가 외곽지역과 구분되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 도심지를 시가지지역으로 한정하여 연구의 대상을 명확하게 하였다(Clinton and Gong, 2013; Zhou et al., 2014; Wang et al., 2015).

## 2. 시간적 범위

본 연구는 최근의 도시열섬현상을 반영하기 위해 2010년부터 2015년까지 6월, 7월, 8월을 시간적 범위로 선정하였다. 이 기간은 국내에서 폭염특보가 발생하는 기간으로(국민안전처, 2015), 생태계와 인간이 열 환경에 가장 취약한 시기이다. 또한 도시 열 환경은 주간뿐만 아니라 야간에도 열대야로 인한 문제가 심각해지고 있다. 열섬현상은 시간에 따라 다르게 나타나며 이에 맞는 저감 방안이 필요하므로 주간뿐만 아니라 야간도 시간적 범위로 포함시켰다(Wang et al., 2015).

## III. 연구 방법

### 1. 연구의 흐름

본 연구는 크게 세 단계로 구성된다(그림 1). 첫

번째 단계는 SUHII를 계산하는 것이다. 이를 위해 우선 Landsat8 영상을 Envi4.5를 활용하여 시가지 지역을 추출하였다. 추출된 시가지지역을 이용하여 도심지와 외곽지역을 선정한 후, 지표면온도를 이용하여 30개 도시의 SUHII를 계산하였다. 두 번째로 선행연구를 참고하여 SUHII에 영향을 주는 변수를 선정하고 구축하였다. 마지막으로 SPSS18.0에서 제공하고 있는 회귀분석을 통해 SUHII와 변수들 간의 관계를 확인하였다.

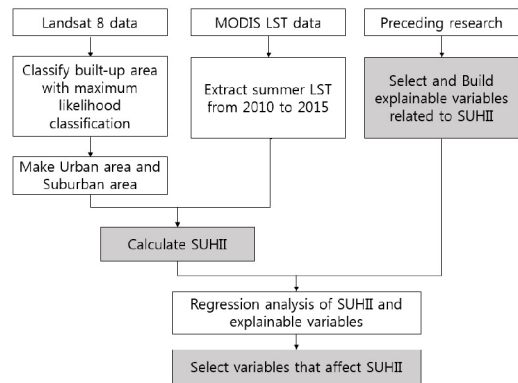


그림 1. 연구의 흐름도  
Figure 1. Study flowchart

### 2. 지표면도시열섬강도(SUHII) 분석

대상지 내 LST는 MODIS 영상자료 중 하나인 MYD11A2로부터 추출하였다(Zhou et al., 2014). MYD11A2는 Aqua MODIS 8-day 합성자료로 1km의 해상도를 가지며 주간(13:30)과 야간(1:30)에 관측된 31, 32번 방사율 밴드로부터 split-window algorithm 방식을 통해 만들어진 영상자료이다(Wan et al., 2004). MODIS 영상은 주간뿐만 아니라 야간에 해당하는 LST를 제공하며 전국적인 분포를 한 번에 취득할 수 있게 하므로 도시규모의 연구에 이용하기 적합하다. 본 연구에서는 2010년부터 2015년까지 6월, 7월, 8월의 주간과 야간영상

자료로부터 LST 값을 추출 하였다. 한 해의 6월부터 8월까지의 DOY153부터 DOY241까지로 12장의 영상이 선택된다. 따라서 총 72장의 영상을 이용하여 LST를 추출하고 이 값들을 평균하여 주야간의 여름철 LST를 구축하였다.

SUHII는 도심지와 주변 외곽지역의 LST 차이로 계산된다(Zhou et al., 2014; Debbage and Shepherd, 2015; Wang et al., 2015). 기존의 연구에서는 일반적으로 SUHII를 도심지와 외곽지역의 평균적인 LST 차이로 설명하였는데, 이런 경우 도시들 간의 SUHII 공간적 차이가 크지 않다는 단점이 있다. 따라서 Kim and Baik(2002)은 UHII를 계산하기 위해서 도심지 온도와 가장 큰 차이가 나는 외지역의 온도를 이용하였다(Kim and Baik, 2002). 본 연구에서는 도시간의 차이를 확인하기 위하여 SUHII값을 크게 할 수 있는 도심지의 최대LST ( $LST_{Umax}$ )와 외곽지역의 최소 LST( $LST_{Smin}$ )의 차이를 이용하여 SUHII를 계산하였다(식 1).

$$SUHII = LST_{Umax} - LST_{Smin} \quad (1)$$

우선, SUHII를 계산하기 위하여 도심지를 시가화지역으로 한정하였다. 본 연구에서 시가화지역이란 토지이용 분류에서 정의한 항목을 기준으로 정의하였으며, 주거지, 상업지, 공업지, 교통지 등을 포함한다(환경부, 2015). 이를 분류하기 위해 2014년과 2015년의 Landsat 8 OLI 중 구름이 없는 맑은 날의 영상을 이용했다. 영상의 2, 3, 4, 5, 6, 7 밴드의 반사도 값을 사용하여 최대 우도 분류법으로 시가화지역과 비 시가화지역(물, 녹지, 나지 및 농지)을 분류하였다(Jia et al., 2014). MLC는 사용자가 지정한 변수를 기준으로 데이터를 분류하는 감독분류 중 하나로, 건물 밀집지역과 녹지, 물을 분류하는데 많이 사용하고 있으며 다른 분류 방법보다 높은 분류 정확도를 보인다(Tan and Li,

2013; Jia et al., 2014; Maimaitiyiming et al., 2014;). 도심 주변 외곽지역은 도심지 바깥 지역으로 보통 도심지부터 5km 혹은 10km 이내로 설정하는 경우가 많다(Pongracz et al., 2006; Clinton and Gong, 2013). 국내도시들은 도심지로부터 1km만 떨어져도 그 지표면 온도에 큰 차이를 보이기 때문에 외곽지역을 충분히 포함시켜줄 수 있는 도심지로부터 5km 이내의 지역을 주변 외곽지역으로 설정하였다. 외곽지역은 다른 도심지가 포함되지 않도록 내부의 시가화지역을 제외시켰다.

따라서 30개의 도시에 해당하는 도심지의 지표면 온도를 추출하고, 도심지로부터 5km 버퍼를 준 외곽지역의 지표면 온도를 추출하였다.

### 3. 설명변수 구축

일반적으로 도시 열섬 강도에 영향을 주는 요인은 도시규모, 지표면의 특성, 기상요소로 나누어져 설명된다. 도시 규모는 도시에서 내뿜는 인공열을 설명하는 변수로, 인공열은 현열로 변환되어 SUHII에 간접적으로 영향을 미친다(Peng et al., 2011). 본 연구에서는 도시규모 변수로 도시크기와 인구밀도를 선정하였다(Hwan et al., 2013). 도시크기와 인구밀도는 국가통계청(KOSIS)에서 제공하는 국토이용현황(2008-2014) 자료와 인구(2010)자료를 이용하여 추출하였다. 지표면의 특성은 식생활력도와 지표면의 반사도가 도시열섬에 영향을 주는 변수로 알려져 있다. 본 연구에서는 식생활력도(Enhanced Vegetation Index, EVI)와 알베도(Albedo)를 변수로 선정하였다(Peng et al., 2011; Clinton and Gong, 2013; Zhou et al., 2014). EVI와 Albedo 모두 MODIS 16-day 합성자료로 각각 해상도 250m의 MOD13Q1와 500m의 MCD43A3로부터 추출하였다. Albedo의 경우 BSA(Black Sky Albedo)와

WSA(White Sky Albedo)가 있는데 BSA는 WSA와 높은 선적인 상관관계를 가지므로 본 연구에서는 WSA만 사용하였다(Peng et al., 2011; Zhou et al., 2014). 기상요소는 기상청(KMA, 2011)으로부터 6, 7, 8월의 평균 일사량, 일 평균기온, 평균 강수량을 추출하여 변수로 선정하였다. 또한 3면이 바다로 둘러싸여있어 바다의 영향을 많이 받는 국내 도시의 특성을 반영하기 위하여 바다로부터 거리를 환경부 토지피복도(2009)자료로부터 추출하여 변수로 선정하였다. 선정된 변수는 표 1과 같다.

#### 4. SUHII에 영향을 주는 변수 선정

본 연구에서는 국내 30개 도시의 주간과 야간의 SUHII에 영향을 주는 변수를 알아내기 위해서 SUHII를 종속 변수로 하고 설명변수를 독립변수로 하는 다중회귀분석을 실시하였다. 일반적으로 SUHII에 영향을 주는 변수 8개를 이용한 회귀분석을 통해서 국내 30개 도시의 SUHII에 영향을 주는 변수는 무엇인지 추정했다. 후진 제거법을 이용하여 선정된 변수들 중 유의하지 않은 변수는 제거하여 모형의 설명력을 높이고자 하였다.

표 1. SUHII와 관련된 선정된 변수  
Table1. Selected variables related to SUHII

Variable	Description	Source
Population density	population/ City area (10,000/km <sup>2</sup> )	Korean Statistical Information Service
City size	Built-up area(km <sup>2</sup> )	USGS Earth Resource Observation and Science Center
EVI	Enhanced Vegetation Index	NASA Reverb
WSA	White Sky Albedo	
Dist_Sea	Distance from sea(km)	Ministry of Environment
Average Radiation	Average Radiation of June, July, August (cal/cm <sup>2</sup> )	Korea Meteorological Administration
Average Temperature	Average Temperature of June, July, August (°C)	
Average Precipitation	Average Precipitation of June, July, August (mm)	

### IV. 결과 및 고찰

#### 1. 지표면도시열섬강도(SUHII) 분석

Landsat 8 영상을 이용하여 국내의 시가지지역을 분류한 결과, Google earth를 이용한 전체 정확도는 79%이고, Kappa 계수는 0.59로 나타났다(표 2). 이를 이용하여 도심지와 외곽지역을 추출했으며, 그 중 대전의 도심지와 외곽지역 주제도는 그림 3과 같다).

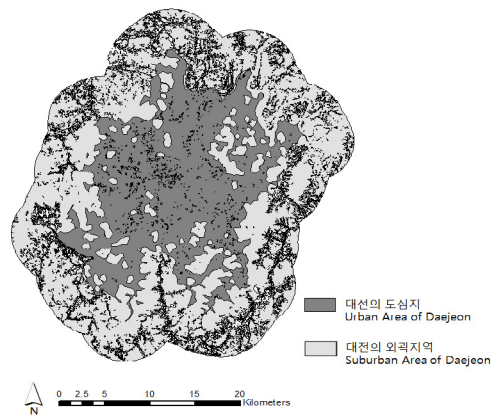


그림 3. 대전의 도심지와 외곽지역  
Figure 3. Urban and suburban area of Daejeon

MYD11A2를 이용하여 대상지내 6월, 7월, 8월의 LST를 평균하여 주·야간의 평균 LST를 구축하였으며, 위에서 도출한 도심지와 외곽지역을 이용하여 각각의 지역에 해당하는 LST를 추출하였다. 이를 통해 SUHII를 계산한 결과는 그림 4과 같다. 주간 SUHII는 19.56°C부터 6.01°C까지 값의 분포를 나타냈다. 포항, 대구, 울산, 부산, 창원이 16°C가 넘는 값을 보였으며 의정부, 용인, 고양, 부천, 광명, 안양에서 낮은 값을 보였다. 야간의 SUHII는 6.58°C부터 2.2°C까지로, 대구, 청주, 울산, 광주가 5°C가 넘는 값을 보였으며 군포, 부천, 안양이 낮은 값을 나타냈다. 이는 중남부지방의 내륙도시에서 도시 열섬 강도가 높으며, 해안도시에서는 상대적으로 낮은 경향을 갖는 것을 나타낸다.

표 2. 시가화지역 분류 정확도 평가  
Table 2. Built-up area classification accuracy assessment

Classified result	Reference data		Sum	User accuracy
	Built-up area	Non built-up area		
Built-up area	40	18	58	69.0%
Non built-up area	4	43	47	91.5%
Sum	44	61	105	
Producer accuracy	90.9%	70.5%		

또한 SUHII값이 야간보다 주간에 더 큰 것을 알 수 있었다. 일반적으로 주간 SUHII는 여름에 특히 커지 경향을 가지며 일부 지역을 제외하고 야간보다 주간에 더 높게 나타난다(Wang et al., 2015)는 선행연구 결과와 일치하는 결과를 보여주었다. 주야간의 SUHII를 도시별로 정렬하였을 때, 상대적으로 야간보다 주간에 더 SUHII가 큰 도시는 포항, 부

산, 창원, 안산 등으로 해안 도시였으며 주간보다 야간에 더 큰 도시는 대전, 용인, 광명 등으로 중부지역의 도시에 분포하는 것으로 나타났다. 또한 주, 야간 모두 크게 나타난 도시는 대구, 울산으로 도시열섬이 심각하게 나타나는 남부지역의 도시였으며, 둘 다 낮게 나타난 도시는 군포, 부천, 안양으로 이들 도시는 도심지와 외곽지역의 온도 차이가 크지 않은 것으로 판단된다.

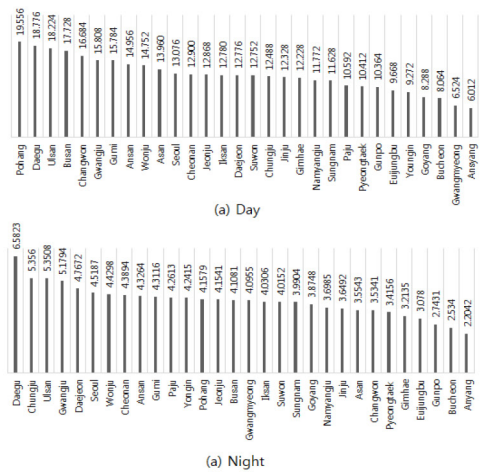


그림 4. 국내 30개 도시의 지표면도시열섬강도  
Figure 4. SUHII of 30 cities in South Korea

## 2. 설명변수 추출

8개의 설명변수를 추출한 결과 표 3, 그림 5와 같이 나타났다. 인구밀도(만명/km<sup>2</sup>)는 2.2부터 0.1까지 수도권에 크게 나타났다. 도시크기(km<sup>2</sup>)는 20.8부터 524까지 서울, 부산, 대구, 광주 같은 광역시에서 크게 나타났다. EVI는 0.4부터 0.7까지 서울과 부산에서 가장 작게 나타났으며, WSA는 121부터 155.3까지 서울, 포항, 부산에서 작게 나타났다. Dist\_Sea(km)는 2.49부터 93.5까지, 일사량(cal/cm<sup>2</sup>)은 449.7부터 481.4까지 남쪽으로 갈수록 높아졌으며, 평균기온(°C)은 23.6부터 24.5, 평균 강수량(mm)은

170.3부터 301.2까지 수도권과 진주에 높게 분포하였다.

표 3. 설명변수 기술 통계값

Table3. Descriptive statistics of explanatory variable

Variable	Min.	Max.	Mean	S.D
Population density(PD)	0.1	2.2	1.0	0.5
City size(CS)	20.8	524	123.1	129.9
EVI	0.4	0.7	0.6	0.1
WSA	121.0	155.3	140.7	8.6
Dist_Sea	2.5	93.5	24.4	24.6
Average Radiation(RD)	449.7	481.4	460.1	8.5
Average Temperature(TP)	23.6	24.5	24.0	0.2
Average Precipitation(PC)	170.3	301.2	240.0	29

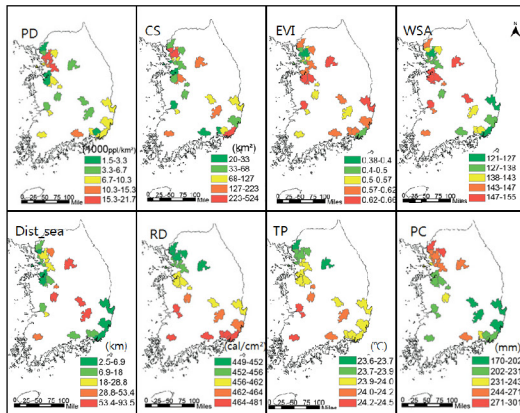


그림 5. 연구 대상지의 설명변수 구축 결과  
Figure 5. Result of variables about study site  
PD(population density), CS(city size), EVI, WSA, Dist\_sea, RD(average radiation), TP(average temperature), PC(average precipitation)

### 3. SUHII에 영향을 주는 변수 선정

1) 주간 SUHII에 영향을 주는 변수  
주간 SUHII를 종속변수로, 9개의 변수를 독립변

수로 하여 회귀분석을 실시한 결과는 아래와 같다 (식 2).

$$y = 55.795 - 0.175x_1 - 0.068x_2 - 2.860x_3 + 0.03x_4 \quad (2)$$

$x_1 = WSA, x_2 = \text{강수량}(mm),$   
 $x_3 = \text{인구밀도}(만명/km^2), x_4 = Dist\_sea$

모형의 R<sup>2</sup> 값은 0.649이며 적합도 검정결과 p=0.000으로 매우 유의하게 나타났다. 또한 변수 간 분산팽창요인(Variance inflation factor, VIF)값을 통해서 다중공선성 문제가 없음을 확인하였다. R<sup>2</sup>값이 8개의 변수 중 국내 30개 도시의 주간 SUHII에 주는 영향력이 유의하게 나타나 모형에 포함된 변수는 WSA, 강수량, 인구밀도, Dist\_sea로 WSA, 강수량, 인구밀도가 작아질수록 바다로부터의 거리가 커질수록 주간 SUHII가 증가한다는 것을 알 수 있었다(표 4). 다른 변수 값이 동일할 경우 WSA가 1증가하면 SUHII가 1.75°C가 감소, 강수량이 1mm증가하면 0.175°C가 감소, 인구밀도가 1만 명/km<sup>2</sup> 증가하면 2.86°C가 감소하는 것으로 파악되었다. 바다로부터의 거리는 1km 증가하면 SUHII는 0.03°C 증가하는 것으로 파악되었다.

WSA는 높아질수록 그 지표면에서 반사되는 에너지양이 많아지고 남아있는 에너지양이 감소하여 지표면온도가 감소한다(Clinton and Gong, 2013; Zhou et al., 2014). 국내 도시들의 경우 익산, 아산, 평택, 천안, 구미, 원주 등에서 높은 WSA값을 갖지만 포항, 부산, 서울에서는 낮은 값을 갖는다. 알베도는 도시 건축물 및 포장, 토지피복의 변화로 인하여 변할 수 있다. 따라서 알베도가 낮은 어두운색의 아스팔트나 콘크리트와 같은 피복보다 녹지 혹은 밝은 색의 피복 면적을 넓힘으로써 알베도를 높일 수 있어 이와 같은 열섬저감 방안이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

강수량의 경우 비가 온 후 증발량이 증가하여 현열이 감소되는 효과를 갖기 때문에 음의 관계를

갖는다. 강수량뿐만 아니라 상대습도가 증가하면 열섬 강도가 낮아지기도 한다(Kim and Baik, 2004). 바다로부터의 거리는 멀수록 열섬강도가 증가하는 것으로 나타났는데, 강수량과 유사한 이유로 바다로부터의 거리가 가까울수록 습도가 증가해 온도 낮아질 뿐만 아니라, 주간에는 바다의 온도가 육지보다 낮아 형성되는 대류로 인한 온도감소가 존재하는 것으로 판단된다.

일반적으로 인구밀도는 SUHII와 양의 관계를 갖는다(Debbage and Shepherd, 2015; Wang et al., 2015). 그러나 국내의 경우 인구밀도가 비교적 낮은 대구, 포항, 울산, 부산, 창원 등의 도시가 높은 SUHII를 갖기 때문에 음의 관계를 보이는 것으로 나타났다. 인구밀도가 높은 도시로는 안양, 부천, 용인 등으로 위의 도시들보다 낮은 SUHII값을 갖는다. 이러한 결과를 보이는 이유는 수도권에 위치한 도시들이 서로 밀집해 있어 외곽지역의 온도가 비교적 높기 때문인 것으로 판단된다. 이는 우리나라에 서울과 경기도에 걸쳐서 크게 나타나고 있는 대규모 도시권으로 인해 나타나는 특징으로 보인다. 따라서 국내의 30개 도시에서는 인구밀도가 높아지면 SUHII가 증가한다는 가설이 성립되지 않는다.

표 4. 주간 SUHII 회귀 모형  
Table 4. Regression model of day SUHII

Model	B	Std. Error	Beta	t	Sig	VIF
constant	55.795	9.398		5.937	.000***	
WSA	-.175	.062	-.437	-2.839	.009***	1.048
PC	-.068	.015	-.571	-4.489	.000***	1.690
PD	-2.860	.966	-.465	-2.961	.007***	1.620
Dist_sea	.030	.018	.214	1.714	.099*	1.110

\*\*\*:1%(p<0.01), \*\*:5%(p<0.05), \*:10%(p<0.1)  
a. dependent variable: SUHII\_Day

2) 야간 SUHII에 영향을 주는 변수

야간 SUHII를 종속변수로, 9개의 변수를 독립변

수로 회귀분석을 실시한 결과는 아래와 같다(식 3).

$$y = -27.816 - 0.04x_1 + 1.575x_2 - 0.662x_3 + 0.17x_4 \quad (3)$$

$x_1 = WSA, x_2 = \text{평균기온}(^{\circ}\text{C}),$   
 $x_3 = \text{인구밀도}(\text{만명}/\text{km}^2), x_4 = \text{Dist\_sea}$

모형의 R<sup>2</sup> 값은 0.444이며 적합도 검정결과 p=0.004로 유의한 것으로 나타났다. VIF값이 작아 다중공산선 문제도 없는 것으로 나타났다. 8개의 변수 중 야간 SUHII에 주는 영향력이 유의한 것으로 나타나 모형에 포함된 변수는 WSA, 평균기온, 인구밀도, Dist\_sea로, 평균기온을 제외하고 주간 SUHII 모형에 포함된 변수와 동일하게 나타났다. 모형의 다른 변수가 동일한 값일 때, WSA와 인구밀도가 커질수록 SUHII가 증가하며, 바다로부터의 거리가 커질수록 SUHII가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 평균기온은 증가할수록 SUHII가 증가하는 것을 알 수 있었다(표 5). 다른 변수 값이 동일할 경우 WSA가 1증가하면 SUHII가 0.04°C가 감소, 인구밀도가 1만/km<sup>2</sup> 증가하면 0.662°C가 감소, 평균기온이 1°C 증가하면 1.575°C 증가, 바다로부터의 거리가 1km 증가하면 0.17°C 증가하는 것으로 파악되었다. WSA, 인구밀도, 바다로부터의 요인은 주간과 마찬가지로의 이유로 SUHII에 영향을 주지만 그 영향력은 주간보다 낮게 나타난다. 강수량의 경우 야간에는 주간보다 증발작용이 줄어들어 야간

표 5. 야간 SUHII 회귀 모형  
Table 5. Regression model of night SUHII

Model	B	Std. Error	Beta	t	Sig	VIF
constant	-27.816	16.115		-1.726	.097*	
WSA	-.040	.020	-.395	-2.025	.054*	1.686
TP	1.575	.679	.355	2.322	.029**	1.583
PD	-.662	.292	-.422	-2.267	.032**	1.231
Dist_sea	.017	.006	.473	3.020	.006***	1.155

\*\*\*:1%(p<0.01), \*\*:5%(p<0.05), \*:10%(p<0.1)  
a. dependent variable: SUHII\_Night



SUHII에 영향을 주지 못하며 이보다 평균기온가 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

### 3) SUHII에 영향을 주지 않는 변수

8개의 변수 중에서 인구밀도, WSA, 강수량, 평균기온, 바다로부터의 거리 변수는 주간과 야간의 SUHII 모형에 유의한 영향을 나타냈지만, 도시크기, EVI, 일사량은 유의한 영향을 나타내지 못했다.

EVI가 높아지면 식생이 주는 그림자 효과와 증발산 효과가 커지면서 열섬 강도가 줄어든다(Peng et al., 2011). 그러나 EVI가 국내의 SUHII에 영향을 끼치지 못한 이유는 국내 도시 내의 EVI값들이 다소 낮아 도시별로 큰 차이가 없었기 때문으로 판단된다. 도시크기는 도시규모를 나타내는 변수로 일반적으로 SUHII와 양의 관계를 갖는다(Imhoff et al., 2010). 그러나 국내 30개의 도시의 규모는 SUHII와 상관성을 갖지 못하고 있다. 도시 규모가 300km<sup>2</sup> 이상인 서울, 고양, 광명이 상대적으로 주간은 SUHII값을 갖고 있으며, 도시규모가 작더라도 포항, 울산의 경우 상대적으로 높은 SUHII값을 갖는다. 따라서 인구밀도와 마찬가지로 도시크기는 국내 30개 도시의 열섬강도에 영향을 주는 변수가 아닌 것으로 판단된다. 일사량의 경우, 야간의 SUHII와는 상관성이 없지만 주간은 SUHII와는 유의한 상관성을 나타냈다(Pearson 0.47, p=0.09). 그럼에도 다중 회귀 분석에서는, 다른 변수들이 통제되었을 때 유의한 영향력을 끼치지 못한 것으로 보인다. 그 이유는 강수량(Pearson -0.538, p=0.000), 평균기온과(Pearson 0.828, p=0.000) 높은 상관성을 갖기 때문인 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구는 국내 30개 도시에서 나타나는 SUHII의 주·야간의 분포와 이에 영향을 끼치는 요인에

대해서 분석하였다. 본 연구를 통해서 국내의 주간과 야간의 SUHII가 다르게 나타나는 것을 밝혀내었다. 시간적 차이로는 여름기간 동안의 SUHII는 야간보다 주간에 더 크게 나타나는 경향을 지녔으며, 공간적인 차이로는 대구, 울산, 창원, 광주가 주·야간 모두 SUHII가 높은 지역에 속했고 부천과 안양이 SUHII가 주간은 지역에 속했다.

설명변수를 이용해서 회귀 분석을 실시한 결과, 국내 30개 도시의 주간과 야간 SUHII에 영향을 주는 변수는 유사하게 나타났다. 공통적으로 WSA, 인구밀도, 바다로부터의 거리가 SUHII에 영향을 주는 변수로 나타났으며 WSA, 인구밀도는 음(-)의 영향력을, 바다로부터의 거리는 양(+)의 영향력을 끼쳤으며, 이들 변수의 영향력은 야간보다 주간에 더 크게 나타났다. 차이점으로는 강수량은 주간에만 (-)의 영향력을, 평균기온은 야간에만 양(+)의 영향력을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 SUHII에 영향을 줄 것으로 판단되었던 EVI, 일사량, 도시크기는 국내 30개 도시에 대해서는 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

SUHII에 영향을 주는 변수 중 도시 설계 및 계획을 통해서 조절이 가능한 변수는 WSA로 나타났다. 회귀분석 결과 WSA가 10 증가할 때마다 주간에는 -1.7°C, 야간에는 -0.4°C의 차이를 가져오는 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 국내 SUHII를 조절하기 위해서는 도시 내 알베도를 높이는 전략이 필요하다고 판단된다. 일례로 요즘에는 옥상을 녹화하는 것보다 백색의 페인트를 이용한 쿨루프(Cool roof)가 온도감소에 효과적이라는 연구가 있다(Zinzi and Agnoli, 2012). 이처럼 도시 내 알베도를 높일 수 있는 연구와 이에 합당한 도시계획이 함께 이루어질 필요가 있을 것이다.

또한 도시별로는 주간에 SUHII가 큰 포항, 부산, 대구, 울산과 같은 도시는 일사량이 크므로 수목이나 건축물의 그림자를 통해 도심지로 들어오는 일

사랑을 줄이는 방향으로 열섬완화 정책이 제시될 필요가 있다. 또한 다른 도시에 비하여 WSA가 특히 낮은 서울, 부산, 포항은 지표면의 알베도를 높이는 방향으로 열섬완화 정책이 제시되어야 할 것이다.

향후 도시화와 기후변화가 진행이 되면 도시열섬 강도는 더욱 심해질 수 있다. 특히 평균기온이 상승하여 야간의 SUHII가 증가할 것으로 예상되므로, 주간뿐만 아니라 야간의 열섬현상을 완화시키기 위한 노력이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

지금까지 도시열섬에 대한 연구는 특정 도시에 대한 절대 온도 값을 이용해 이루어진 경우가 많았기 때문에 그 도시에만 해당하는 열섬 완화정책을 제안하지 밖에 못했다. 하지만 본 연구는 도시열섬을 정량적으로 측정하여 국내 도시별, 주야간별 도시열섬의 분포를 분석하여 각각 어떤 원인에 의해서 결정되는지 분석할 수 있었다.

본 연구에서는 모형의 설명력이 다소 낮게 나타나는 한계점이 있었다. 일반적으로 도시열섬강도 예측모형은 높게 나타나기 어려운데, 이는 도시열섬이 복잡한 환경의 영향으로 인해 나타나기 때문이며 본 연구에서 분석 단위가 도시단위로 거시적인 차원에 머물러 있기 때문인 것으로 판단된다.

앞으로 본 연구를 바탕으로 도시열섬의 시공간적 변동과 그 원인에 대한 연구가 미시적인 차원에서 추가적으로 진행되어 열섬현상을 효과적으로 완화시킬 수 있는 세부적인 정책이 제시될 필요가 있을 것으로 판단된다.

주1. 30개의 도시에 대한 주제도를 보여주기에 어려움이 있어 도심지와 외곽지역의 형태를 가장 잘 파악할 수 있는 대전을 중심으로 표현하였다

## 인용문헌

### References

1. 국민안전처, 2015. 「2015년 8월 재난안전종합상황 분석 및 전망」, 서울. Ministry of Public Safety and Security, 2015. *August Disaster Comprehensive Situation Analysis and Forcast Summary*, Seou.
2. 구해정, 김연희, 최병철, 2007. "서울시 도시 열섬 구조의 변화에 관한 연구", 「기후연구」, 2(2): 67-78. Koo, H., Kim, Y., Choi, B., 2007, "A Study on the Change of the Urban Heat Island Structure in Seoul", *Meteorological Research*, 2(2): 67-78
3. 김덕환, 김연수, 홍승진, Ly, S., 정영훈, 김형수, 2013. "RCP 시나리오를 고려한 극지통계분석 및 빈도해석", 「한국습지학회지」, 15(4): 595-607. Kim, D., Kim, Y., Hong, S., Ly, S., Jung, Y and Kim, H., 2013. "The ETCCDI and Frequency Analysis using RCP Scenarios", *Journal of Korean Wetlands Society*, 15(4), 595-607.
4. 김준식, 이동근, 성선용, 정승규, 박종훈, 2015. "정규화 식생지수를 이용한 토지이용에 따른 도시열섬 취약지 특성분석", 「국토계획」, 50(5): 59-72. Kim, J., Lee, D., Sung, S., Jeong, S., Park, J., 2015. "Study of vulnerable district characteristics on urban heat island according to land use using normalized index", *Journal of Korea Planning Association*, 50(5): 59-72.
5. 도우근, 정우식, 2012. "부산지역 도시 열섬의 변화경향 분석(2006-2010)", 「한국환경과학회지」, 21(8): 953-963. Do, W., Jung, W., 2012. "An Analysis on the Variation Trend of Urban Heat Island in Busan Area", *Journal of the Environmental Sciences*, 21(8): 953-963
6. 박석봉, 2004. "광주지역의 여름철 열섬현상 측정 및 분석", 「한국태양에너지학회」, 24(4): 66-78. Park, S., 2004. "Measurement and Analysis of Heat Island in summer in Gwangju", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 24(4): 66-78.
7. 안지숙, 김해동, 2006. "대구지역의 기상조건에 따른

- 도시열섬강도의 계절적 변화 특성”, 「한국환경과학회지」, 15(6): 527-532.
- Ahn, J., Kim, H., 2006, “On the Seasonal Variation of Urban Heat Island Intensity According to Meteorological Condition in Daegu”, *Journal of the Environmental Sciences*, 15(6): 527-532.
8. 이강국, 홍원화, 2007. “도시고온화 현상에 따른 열섬·냉섬 특성에 관한 연구 -대구광역시를 중심으로-”, 「대한건축학회 논문집」, 23(8): 219-228
  - Lee, K., Hong, W., 2007. “The Study on the Heat Island and Cool Island According to Trend toward Higher Temperature in Urban”, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 23(8): 219-228
  9. 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.
  10. Debbage, N., and Shepherd, J. M., 2015. “The urban heat island effect and city contiguity”, *Computers, Environment and Urban Systems*, 54: 181 -194.
  11. Fujibe, F., 2009. “Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan”, *International Journal of Climatology*, 29(12): 1811 -1822.
  12. Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., and Briggs, J. M., 2008. “Global change and the ecology of cities”, *Science*, 319(5864): 756 -760.
  13. Hutcheson, G. D., and Sofroniou, N., 1999. *The multivariate social scientist: Introductory statistics using generalized linear models*, Wiltshire: Sage.
  14. Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E., and Bounoua, L. 2010. “Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA”, *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 504 -513.
  15. Jia, K., Wei, X., Gu, X., Yao, Y., Xie, X., and Li, B. 2014. “Land cover classification using Landsat 8 Operational Land Imager data in Beijing, China”, *Geocarto International*, 29 (September): 941 -951.
  16. Kim, Y. H., and Baik, J.J., 2002. “Maximum urban heat island intensity in Seoul”, *Journal of Applied Meteorology*, 41(6): 651 -659.
  17. Kim, Y. H., and Baik, J. J., 2004. “Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea”, *Theoretical and Applied Climatology*, 79(3-4): 151 -164.
  18. Lin, W., Yu, T., Chang, X., Wu, W., and Zang, Y., 2015. “Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: Method and test”, *Landscape and Urban Planning*, 134: 66-75
  19. Maimaitiyiming, M., Ghulam, A., Tiyp, T., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Halik, Ü., ... Caetano, M., 2014. “Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89: 59 -66.
  20. O’Loughlin, J., Witmer, F. D. W., Linke, A. M., Laing, A., Gettelman, A., and Dudhia, J., 2012. “Climate variability and conflict risk in East Africa, 1990-2009”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(45): 18344 -18349.
  21. Pongracz, R., Bartholy, J., and Dezso, Z., 2006. “Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis”, *Advances in Space Research*, 37: 2191 -2196.
  22. Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., and Assimakopoulos, D. N., 2001. “On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings”, *Solar Energy*, 70(3): 201 -216.
  23. Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Oettle, C., Breon, F. M., Nan, H., Zhou, L. and Myneni, R. B., 2011. “Surface urban heat island across 419 global big cities”, *Environmental Science & Technology*, 46(2): 696-703.
  24. Tan, M. H., and Li, X. B., 2013. “Integrated

- assessment of the cool island intensity of green spaces in the mega city of Beijing”, *International Journal of Remote Sensing*, 34(8): 3028–3043.
25. Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., and Li, Z.-L., 2004. “Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature”, *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 261–274.
26. Wang, J., Huang, B., Fu, D., and Atkinson, P., 2015a. “Spatiotemporal Variation in Surface Urban Heat Island Intensity and Associated Determinants across Major Chinese Cities”, *Remote Sensing*, 7(4): 3670–3689.
27. Zhou, D., Zhao, S., Liu, S., Zhang, L., and Zhu, C., 2014. “Surface urban heat island in China’s 32 major cities: Spatial patterns and drivers”, *Remote Sensing of Environment*, 152: 51–61.
28. Zinzi, M., Agnoli, S., 2012. “Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region”, *Energy and Buildings*, 55: 66–76.
29. 환경부, “토지피복 분류체계”, 2015.11.15.읽음. <https://egis.me.go.kr/ba/grdCoverIntroPage.do?mode=2>

Date Received 2015-11-18  
 Date Reviewed 2015-12-31  
 Date Accepted 2015-12-31  
 Date Revised 2016-01-14  
 Final Received 2016-01-14