



# 열수지를 활용한 서울시 열환경 개선을 위한 공간 유형화\*

## Spatial Typification based on Heat Balance for Improving Thermal Environment in Seoul

권유진\*\* · 안새결\*\*\* · 이동근\*\*\*\* · 윤은주\*\*\*\*\* · 성선용\* · 이기승\*\*  
Kwon, You Jin · Ahn, Saekyul · Lee, Dong Kun · Yoon, Eun Joo · Sung, Sunyong · Lee, Kiseung

### Abstract

The purpose of this study is to identify the spatial types for thermal environment improvement considering heat flux and its spatial context through empirical orthodox formulas. First, *k*-means clustering was used to classify values of three kinds of heat flux - latent, sensible and storage heat. Next, from the *k*-means clustering, we defined a type of thermal environment (type LHL) where improvement is needed for more comfortable and pleasant thermal environment in the city, among the eight types. Lastly, we compared and analyzed the characteristics of each classified thermal environmental types based on land cover types. From the study, we found that the ratio of impervious surfaces, roads, and buildings of the type LHL is higher than those of the type HLH (relatively thermal comfort environment). In order to improve the thermal environment, the following contents are proposed to urban planners and designers depending on the results of the study. a) Increase the green zone rate by 10% to reduce sensible heat; b) Reduce the percentage of impermeable surfaces and roads by 10% ; c) Latent heat increases when water and green spaces are expanded. This study will help to establish a minimum criterion for a land cover rate for the improvement of the urban thermal environment and a standard index for the thermal environmental improvement can be derived.

**키 워 드** ■ 열유속, 공간적 분류, 도시열섬현상, 도시협곡, 열 저감

**Keywords** ■ heat flux, spatial classification, Urban Heat Island Effect, urban canyon, heat mitigation

### I. 서론

열섬 현상은 도시가 대기온도 혹은 지표온도가

주변지역보다 높게 나타나는 현상(Oke, 1970)으로

도시 속 공간의 기온 상승을 야기한다. 특히 인구

\* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 18AUDP-B102560-04).

\*\* Doctoral Post-Graduate Student, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National Univ.

\*\*\* Master's-degree student, Dept. of Landscape Architecture & Rural System Engi., Seoul National Univ.

\*\*\*\* Professor, Dept. of Landscape Architecture & Rural System Engineering, Seoul National Univ.  
(Corresponding author: dkleee7@snu.ac.kr)

\*\*\*\*\* Doctoral Post-Graduate Student, Interdisciplinary Prog. in Landscape Architecture, Seoul National Univ.

\* Associate Researcher, National Institute of Ecology

\*\* Researcher, Graduate School of Public Health

가 밀집되어 있는 대도시들의 팽창과 더불어 노령화가 가속되면서 여름철 기온 상승으로 인한 도시의 폭염 현상에 취약한 사람들의 온열질환에 대한 국내외 피해가 증가하고 있다(Stern, 2007; 명수정, 2009).

도시 열섬 현상은 도시 표면의 거칠기 즉 건축물의 유무에 따른 열대류현상에 영향을 받는다(T. Oke, 1970). 도시의 특징적인 공간구조인 협곡구조는 낮 동안 갇힌 복사열을 밤까지 유지하면서 외곽지역보다 기온을 상승시킨다. 이에, 최근 도시의 공간적 구조에 기초하여 도시 열섬과 기온저감(Savio et al., 2006; Menon et al., 2010; Jacobson and Ten Hoeve, 2012)에 대한 연구와 기온에 기초한 도시 공간유형 구분 혹은 활용 연구(여인에 외, 2009, 송봉근, 2011; 김현욱 외, 2012; Lindberg and Grimmond, 2011; Li et al., 2017) 및 도시열섬에서의 피복에 따른 영향에 대한 연구(김준식, 2015; Gallo et al., 2014; Sobstyl et al. 2018)가 진행된 바 있다.

한편, 모든 도시에 적용 가능한 도시기온 연구 중 하나로, Stewart와 Oke가 고안해낸 Local Climate Zone (LCZ)을 꼽을 수 있다(I.D. Stewart et al., 2012). 이 방법은 지역적 환경과 기후 관련성에 대해 객관적이고 표준화된 방법으로 지역 기후 구역을 분류를 하는 것이다. 그러나 이 방법은 피복, 구조, 구조물의 재료가 균일한 특징을 가질 경우에 한해서 200~500m의 최소 반경을 갖는 영역을 전제조건으로 하고 있다. 이 연구는 공간을 구성하고 있는 건축물의 유무와 크기, 밀집 정도 및 녹지의 유무와 같은 광역적 범위의 유형을 통해 열섬현상을 온도 측면에서 이해하고 있으나 근본적 원인이 되는 복사열의 발생 원인과 공간과의 관계에 대한 이해가 부족하여 실질적인 지적 범위에서의 계획 혹은 설계에 적용하기 난해한

방법이다. 그러나 도시 열섬 현상에서 도시 지표면 온도와 대기온도는 열에 의한 결과이다. 도시 토지피복 요소를 정확하게 진단하고 도시 공간에 분포하는 열을 구조적으로 분석한다면 도시 열환경 개선을 위한 공간의 특성을 파악할 수 있다. 또한 공간 내에서의 열평형(잠열, 현열, 저장열(인공열 포함))을 이루고 있는 열 요소에 대한 이해에 기초하여 공간별 구성요소의 특성을 구명할 필요가 있다.

도시 협곡 구조에서의 열섬 현상을 저감 혹은 열섬에 적응하기 위해서는 열섬 현상자체를 이해하고 도시 공간의 물리적 요소와 열섬 현상의 관계 및 영향에 미치는 요소들에 대한 고찰이 필요하다. 토지 피복 요소들이 공간의 열수지 요소에 미치는 영향의 정도를 각각 도출하여 도시 계획 설계에 있어 그 준거를 마련하는데 연구의 의의가 있다(Mascart et al., 1995; Grimmond and Oke 1991).

공간 내에 존재하는 열에너지의 총량인 순복사열은 사람들이 느끼는 현열(Sensible Heat), 물체의 물리적 상태변화에 관여하는 잠열(Latent Heat), 온도를 가지고 있는 모든 사물에 담긴 저장열(Storage Heat)의 합에서 인공열을 제외한 열로서(Masson et al., 2002), 열의 평형을 이루고 있다(열수지, Sallee, 2014).

현열이 높으면 공간 사용자가 더위를 느끼고, 열수지에서 트레이드오프 관계인 잠열이 낮아지면 현열이 더욱 높아진다. 그리고 저장열이 낮아지면 지표면으로 들어가지 않고 대기 중에 잔류하는 열이 많게 된다. 본 연구에서 논의되는 '열환경 개선 필요지역'은 대기 중에 현열을 높이는 조건을 가진 지역이라고 정의하고자 한다.

본 연구의 목적은 도시의 전반적인 열 환경 개선 혹은 열섬현상의 저감을 위해 우선적으로 개

선이 되어야 할 지역을 찾아내는 기법을 마련하고, 그 지역의 토지피복의 변화에 대한 증거를 제시하는 것이다. 또한 향후 이러한 연구가 다양한 도시공간에 축적된다면 열섬저감을 위한 도시설계 지침 수립에도 기여할 수 있다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구대상지

서울시는 산과 숲으로 둘러싸인 분지형태의 지형적 특징과 과밀화된 도시화로 인한 고밀도 고층 빌딩으로 인해 여름철 열섬현상이 높다. 또한 서울은 OECD 가입국들 중 인구밀도가 1위인 대도시(국토연구원, 2015)로 전체 인구 대비 노년인구가 9.3%를 차지한다. 따라서 서울시는 지구온난화로 인한 기후변화에 더해 도시 열섬현상에 의한 기온상승이 가중(기상청, 2011)되고 있고 지속적인 노년 인구비율의 상승으로 여름철 폭염에 따른 취약인구수가 많을 것으로 예상된다. 이에 여름철 열환경을 개선해야할 대표적 지역으로 공간적 특성을 구명할 연구 대상지로 서울을 선정하였다.

### 2. 연구흐름

연구의 주된 내용은 서울의 격자별 열수치에 따른 유형화를 하여 열이 높아 열환경을 개선해야 할 지역의 특성을 평가한 연구로서 그림 1과 같은 연구 수행과정을 통해 분석 및 평가를 진행하였다.

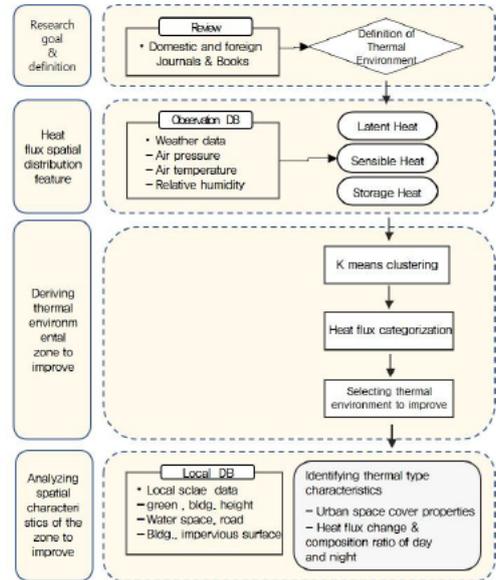


Figure 1. Research Flow

1단계에서, 국내외 선행연구를 참고하여 도시 공간에서의 열 수치를 구성하고 있는 열 요소인 잠열, 현열, 저장열의 특성을 통해 열섬 현상에 취약한 공간을 파악하였다.

2단계에서, 서울시의 기상 데이터(대기온도, 대기압, 상대습도)와 공간 데이터를 통해 100m × 100m 격자(pixel)별로 열수치 요소들의 수치를 산정했다.

3단계에서, 산정된 열수치를 바탕으로 열수치 요소(잠열, 현열, 저장열; 3. 개선지역 정의 참조)의 밀집도에 따른 1) k-means 군집분석을 통해 8개의 군집으로 나뉘었다. 2) 군집을 열 요소의 고저에 따라 유형화하였다. 3) 8개의 유형들 중에서 개선을 해야 할 지역을 도출하여 지도화 하였다.

4단계에서, 유형별 공간적 특성을 파악하기 위해 격자간의 토지피복을 5종류(녹지, 건축물, 불투수성표면, 수공간, 도로)로 구분(Grimmond et al., 1991)하였다(그림 3). 구성한 토지 피복비율 데이터와 8가지 열환경 유형의 주·야간에 따른 열요소

수치의 변화에 영향을 주는 공간특성을 분석하였다(그림1).

### 3. 입력자료 구축

2015년부터 시작된 열환경 연구로서 기상데이터의 시간적 범위는 2015년 장마가 지난 8월 중 최고기온(34.4℃)이고 일평균 윤량(3.1)이 비교적 적고 강수가 없었던 8월 6일로 정했다. 해당일의 일평균 상대 습도는 64%이고 일평균 대기압은 100.19 kPa 이었다(기상자료개방포털, 2015).

서울시 기상관측장비 38개소와 사설 업체인 SKTech X의 기상관측장비 249개소를 더해 총 287개소의 관측소에서 수집한 해당일(8월 6일, 2015년)의 대기온도, 대기압, 상대습도 등의 기상 데이터(표1)는 본 연구의 개선지역 유형화를 위해 활용된 잠열, 현열, 저장열의 열수치를 산정하기 위한 필수 인자로 반영하였다(그림 2).

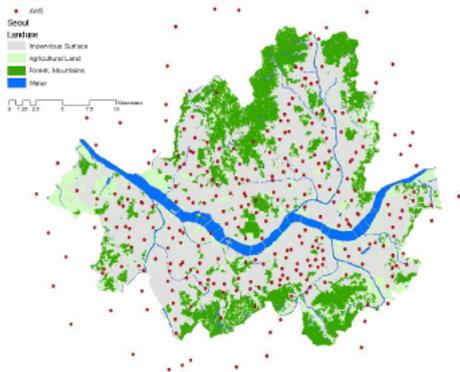


Figure 2. Automatic Weather Station Location

Table 1. Input Data

Classification	Input data	Source
Meteorology data for heat flux distribution	-air temperature, -relative humidity, -cloud cover, -saturated water vapour pressure	-Korea Meteorological Administration
Thermal environment derivation to be improved	-latent heat Eq. -sensible Eq. -storage heat Eq.	Holtslag, 1983 Loridan, Grimmond 2011
Spatial attributes	-Land cover subdivisoned-map (green space, wetland, impervious surface) -shp. file of Seoul administrative district -Building shp. file -Roads' width shp file	-Ministry of Environment, -Statistical Geographic Information Service(SGIS), -Seoul Information Communication Plaza

열수치를 산정하기 위해 사용된 데이터로 서울시 건축물 데이터(통계지리정보서비스), 토지이용도, 토지피복 데이터(국토환경정보센터), 서울시행정구역 데이터(SGIS 통계지리정보서비스, 2015), 도로중심선 데이터(서울시 정보소통광장)가 있다(표 1). 또한 100 × 100m 격자 파일을 별도로 구축하여 열환경 피복데이터(그림3)와 열분포를 지도화하는데 사용하였다.

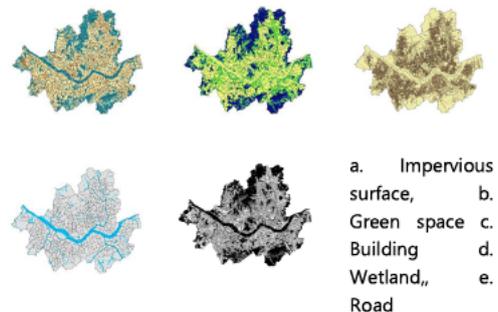


Figure 3. Land Surface Data

#### 4. 열의 공간적 분포 산출

대상지의 공간적 범위와 연구목적에 고려했을 때 지역규모 열 산정에 해당하므로, 지역규모 중 가장 고해상도인 100m의 해상도에서 격자별로 열을 분석하였다. 태양에서부터 복사되어 도시협곡 내로 도달하는 열은 다양한 요인과 복잡한 상호작용을 거치기 때문에 단계적으로 구분하고, 각 단계에서의 열을 기존에 알려진 물리식을 이용하여 산정하였다. 단, 각 식에서 포함되는 일부 계수는 실측자료와의 비교를 통하여 지역에 맞게 보정되었다(Appendix).

도시 협곡의 단위 공간 당 총 열량인 순복사량과 이를 구성하는 현열, 잠열, 저장열 각각의 특성 및 산정식(Appendix 수식)에 따르면, 각 열은 태양으로부터 직접 도달하는 복사량 외에도 도시 내 건물의 높이와 밀도(SVF, 그림자 등), 도시 피복 (녹지, 수공간, 도로 등 재질별 상수) 등의 “공간적 특성”에 따라 달라짐을 알 수 있다. 즉, 도시의 공간적인 특성이 원인이 되어 도시의 열이 결정되고, 이것은 사람이 느끼는 열 쾌적성, 대기 및 지표면 온도에 영향을 미친다고 할 수 있다. 따라서 대상지의 순복사량과 현열, 잠열, 저장열의 공간적 분포차이를 분석함으로써 도시 열섬 완화를 위해 ‘우선적으로 개선이 필요한 지역(열의 결과)’을 도출할 수 있을 뿐만 아니라, ‘개선지역의 공간적 특성 및 개선 방향(열의 원인)’ 정량적으로 분석하는 것 역시 가능하다.

#### 5. 열환경 개선 필요지역의 도출

##### 1) 열환경 개선 필요 지역 정의

태양열로부터 입사되는 단파와 공간 구성요소로 인한 장파복사열의 합으로 공간에 존재하는 실질

열을 순복사열이라고 한다.

순 단파열량( $Q_k$ )과 순 장파열량( $Q_L$ )을 더한 열량값이 순복사열( $Q_n$ )이 되는데 이를 열수지 요소와 함께 반영한 식은 다음과 같다(수식 1).

$$Q_n = Q_k + Q_e + \Delta Q_s = Q_k + Q_L \quad (1)$$

열수지 모형에서 현열(sensible heat)은 대기 온도를 변화시키는데 큰 영향을 미치는 열로 사람이 느낄 수 있는 열이다. 저장열(storage heat)은 순복사열에서 지극히 낮은 비율(약 16%, S. Kato et al., 2007)을 차지하지만 역시 지표면 온도에 영향을 미친다. 단 저장열은 대기중에 방출되는 현열과는 달리 지하로 침투되는 열이다(Clothier et al., 1986). 잠열(latent heat)은 에너지 상태를 변화 시키는 열로 수공간과 녹지공간에서 많이 방사가 된다.

이들 세 가지의 열량들이 합해져 순복사열량이 된다. 잠열은 현열이나 저장열과 달리 열량의 증가에 기여하지 않고 물리적 변화에 기여하는 열이다. 순복사열량이 일정하게 유지될 경우 잠열이 증가하면 상대적으로 현열과 저장열이 감소한다. 반대로 현열과 저장열이 증가하면 잠열이 줄어드는 상쇄효과를 가진다. 결국, 열수지 모형에서 공간의 온도변화에 영향을 미치는 현열과 저장열이 증가하면 공간의 온도가 상승하게 된다.

공간에서의 열적 쾌적성에 영향을 미치는 온도와 습도는 높을수록 쾌적성이 떨어진다. 따라서, 여름철에 공간 안에서 사람이 느낄 수 있는 열량이 증가하여 온도가 상승하면 열적 쾌적성이 떨어지는 공간이 된다. 반대로 잠열이 높아 상대적으로 현열과 저장열이 낮아지면 공간 이용자들이 느끼는 열적 쾌적성이 높아진다. 이에 일평균 온도가 가장 높은 시간대를 중심으로 잠열, 현열, 저장열, 3가지의 변화를 통해 현열이 가장 높은 수치

를 보이는 지역을 도출하였다.

3가지의 열수지 구성요소의 고저에 따라 8가지의 조합이 발생한다. 열환경 개선이 필요한 지역은 대기 온도와 관련된 현열이 높고 현열의 형태로 대지에 축적되는 저장열의 수치가 낮고 음수인 경우 그 절대값이 주변보다 높은 지역이다. 또한 물리적 상태 변화에 관여하여 열수지에 있어 현열과 저장열을 상쇄시키는 잠열이 주변보다 낮은 지역(열환경 개선 필요 지역 : LHL)을 의미한다. 그와는 반대로 열 환경이 상대적으로 양호한 지역은 현열이 낮고 잠열과 저장열이 상대적으로 높거나 저장열이 음수로서 그 절대값이 적은 지역(열환경 양호 지역 : HLH)이다.

## 2) 열환경 개선 필요지역 도출

도시 내의 건축적 인자들의 특성만을 반영하기 위해 잠열값과 현열값에 큰 영향을 주는 큰 생태축인 서울시 주변의 주요산과 한강(주요 수계)의 열값을 배제한 셀들의 열 수치만으로 군집분석을 시작하였다.

개선을 시켜야할 열환경의 요소 분석을 위한 *k*-means clustering (케이 평균 군집분석)은 온도의 분포를 도면에 나타내는 기존 연구들에서 사용되어져 온 통계학적 방법이다(Zscheischler, 2012; M. Kottek, 2006). 또한 태양 복사 영역을 식별하는 데 사용된 공간적 연구에도 사용되었다(Z. Zhou, 2018).

*k*-means clustering 은 고차원 데이터 공간을 프로토 타입으로 정의하고 프로토 타입에 가장 가까운 데이터로 구성된 다수의 클러스터로 나눠주는 방법이다(A. Jain, 2010). *k*-means clustering 은 대표적인 비계층적 군집방법으로 다량의 자료를 신속하게 그루핑하는 장점이 있다. 반면 군집이 형성되는 과정을 파악할 수 있게 덴드로그램을

그려주는데 유리한 계층적 군집분석(단일, 완전, 평균, 중심결합기준, 와드방식)은 자료의 크기가 크면 분석이 어렵다. 또한 등간척도인 열의 특성상 상대적 구분을 위해 초기 구성을 선택하는 경우, *k*-means clustering이 계층적 분석보다 유리하다(Janssens et al., 2008). 그 외 여러 가지 다른 군집방법들이 있으나 Köppen-Geiger의 연구에서 *k*-means clustering은 활용면에서 우수하다(Köppen-Geiger, 1970)고 주장하고 있다.

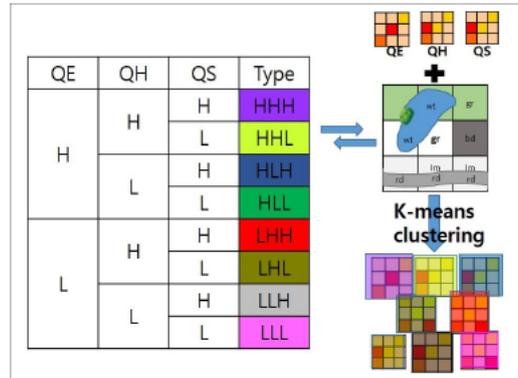


Figure 4. *k*-means clustering

결국, *k*-means clustering은 열 수치를 기본으로 한 공간적 요소를 연관시켜 공간을 분류하는데 그룹의 대표성을 표출할 수 있는 방법이다.

열 산정식을 통한 열수지 요소들(잠열, 현열, 저장열)의 분포를 바탕으로 *k*-means clustering을 이용하여 열환경에 관한 유형이 총 8가지(HHH, HLH, HHL, HLL, LHH, LHL, LLH, LLL)로 구분했다. 8가지 유형이란 3가지의 열요소에 대해 각 열수치의 고저로 인하여 나타날 수 있는 가지 수이다(그림 4).

유형의 명칭은 잠열, 현열, 저장열 순으로 열수치의 상대적 높음과 낮음으로 표현이 되었다. 예를 들어 HHH는 해당 격자셀의 잠열( $Q_e$ ), 현열( $Q_h$ ), 저장열( $\Delta Q_s$ )이 다른 격자셀 보다 상대적으로

로 높고 HLH는 잠열과 저장열이 상대적으로 높고 현열이 상대적으로 낮은 격자셀을 가지고 있는 지역을 의미한다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 열의 공간적 분포

##### 1) 주간

주간 유형별 분포도(그림 5)에서 많은 면적을 차지하는 잠열만 높은 유형(HLL)은 도시 외곽지역의 산악지역과 시가지내의 남산, 국립묘지와 같은 녹지이고 잠열과 저장열이 높은 지역(HLH)은

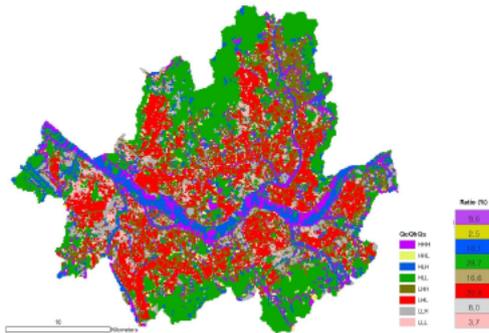


Figure 5. Daytime Classification

한강과 안양천, 탄천과 같은 수변지역이다. 녹지보다 수공간이 저장열이 높게 나타난 이유는 태양 고도가 높아 천정각이 작은 여름철 주간에는 수공간 표면에서의 알베도가 산림 혹은 녹지보다 낮아 절대적으로 열이 물속으로 많이 투입된다(Kothe, et al., 2010; Oke, et al., 1998).

저장열의 특성(개선필요지역 참고)상, 수면 아래로 흘러들어가는 열이 많을수록 저장열은 높아지고 알베도가 높은 녹지가 있는 지역은 상대적으로 저장열이 낮아진다(Appendix 그림 B).

표 2에서, 5가지 토지 피복 종류는 기존 연구

에서 명시한 3가지(녹지, 인공지반, 건폐(지붕과 벽); Grimmond and Oke, 1999)에 수공간과 도로를 추가적으로 포함한 것이다. 도로는 공간의 순복사열 산정에 있어 천공률 및 종횡비를 위해 사용되므로 추가되었다.

토지 피복 비율은 열환경 유형에 해당되는 종류들의 평균 비율에 의해 산출되었다. 도시 온도 유형화 (Local Climate Zone)에서도 피복 종류를 포함한 공간 요소들의 측정치 평균을 사용하여 유형별 공간요소들의 범위를 산정한바 있다(Stuart and Oke, 2012).

8가지의 유형들에서 도출된 잠열, 현열, 저장열의 수치는 각 유형에 속한 열수지 요소들의 평균 수치이다. 열수지 요소들이 표2에서 제시하는 평균 수치를 기준으로 일정한 범위를 갖는다. 또한 피복비율을 상대적 순위에 따른 상중하로 나뉜 종류의 피복요소에서 각 유형들에 해당하는 상대적 수준이 유형의 열적 특성에 당위성을 갖게 했다.

격자셀 안에 차지하고 있는 5가지 피복의 비율을 나타냈을 때 격자마다 차지하고 있는 비율들의 순위를 통해 상대비교를 한 분류로 녹지비율(상)의 의미는 전체 격자에서 차지하고 있는 각 셀들의 녹지비율이 상위 약 33% 에 해당한다. 이어서, (중)은 상위 약 33~66%, (하)는 하위 약 33%이다.

즉, HLH는 잠열이 높은 유형으로 수공간 비율이 0.3 으로 나타났다. 이러한 수치는 격자셀의 전체 비율인 1에 비해 적지만 유형 중에 수공간이 차지하는 면적이 상대적으로 큰 지역이 되고, 잠열이 높아졌다는 설명력을 갖는다. 공간의 열수치가 열 요소들의 유효한 범위를 갖고, 모든 피복 비율이 표 2와 같이 만족한다면 해당 유형에 속한다고 할 수 있다.

Table 2. Land surface ratio and Heat flux of Daytime types

(Unit: Ratio : W/m<sup>2</sup>)

Type	Green space	Building	Impervious surface	Wetland	Road	Latent heat	Sensible heat	Storage heat
HHH	0.3++	0.1++	0.2++	0.2+++	0.2+++	63±30	142±15	187±33
HHL	0.4++	0.3++	0.2++	0.0+	0.1++	58±34	150±30	111±15
HLH	0.4++	0.03+	0.2+	0.3+++	0.1++	104±58	104±14	177±37
HLL	0.8+++	0.0+	0.1+	0.02+	0.04++	107±46	64±27	67±39
LHH	0.1++	0.2++	0.5+++	0.01+	0.2+++	20±1	153±22	174±34
LHL	0.03+	0.4+++	0.3++	0.0+	0.2+++	20±0.6	160±25	108±15
LLH	0.1++	0.1++	0.7+++	0.0+	0.1++	20±1	105±12	204±48
LLL	0.0+	0.2++	0.5+	0.1++	0.2+++	20±0.8	103±13	102±20

low level      middle level      high level

다음으로 높은 비율을 차지한 개선필요 지역인 현열이 높고 잠열, 저장열이 낮은 유형(LHL)은 다른 유형에 해당하는 격자 셀들의 토지피복 구성비율 대비 건폐율(40%)과 도로 비율(20%)이 상대적으로 높은 시가지 지역이다(표2). 이는 잠열이 상대적으로 낮고 주로 시가지에 분포하고 있는 유형 LHH, LLH와 비교해 볼 때 건폐율이 가장 높아 현열의 대류 현상을 방해하고 열이 공간에 정체된다. 또한 저장열이 지표면 아래로 적게 유출됨으로써 다른 유형에 비해 보행자들로 하여금 상대적으로 더 더위를 느끼게 한다.

주간에 모든 열수지 요소가 높은 유형 HHH는 주로 수변지역(수변 제방 및 한강 고수부지)과 광폭의 교량이 위치해 있는 장소로 잠열이 높은 다른 유형(HHL, HLH, HLL)에 비해 그 수치가 낮다(63 W/m<sup>2</sup>). 이는 직접적인 수공간에 비해 잠열이 낮지만 주변의 증산작용으로 잠열이 낮은 곳보다는 높게 나타나는 현상이다. 또한 주변에 고층빌딩이 없어 큰 그림자가 거의 없고 알베도가 낮은 인공지반으로 되어 있어 낮 동안 입사열이 땅속으로 많이 들어가면서 현열과 저장열이 높게 된다.

반면 LLL은 서울시에서 작은 면적(3.7%)을 차지하고 있다. 주로 도심 속의 고층 아파트 단지에서 건축 동간 폭이 넓어 천공률이 큰 장소이다.

LHH와 LLL은 도로비율, 건폐율, 불투수성비율은 유사하고 수공간비율과 녹지율의 차이로 인해 현열과 저장열에서 차이를 보인다(표2). 이는 LHH가 LLL에 비해 수공간 비율이 낮고 녹지율이 높아 여름철 천정각에 의해 수중 투입열이 적어 현열이 상대적으로 높게 나타나기 때문이다.

## 2) 야간

8가지 유형중 야간의 잠열이 가장 높은 곳은 HHL 유형에서 나타나며 가장 낮은 곳은 LLH 유형으로 두 유형의 피복 요소비율이 녹지율에서 월등히 차이가 난다(그림 6). 현열은 야간에 모두 음수로 나타나는데 이는 태양열의 부재로 지표면이 냉각됨에 따라 열이 서울 외곽지역에서 유입되는 것을 의미한다. 저장열 또한 음수로서, 이는 지표면 밖으로 방출되는 열을 의미한다.

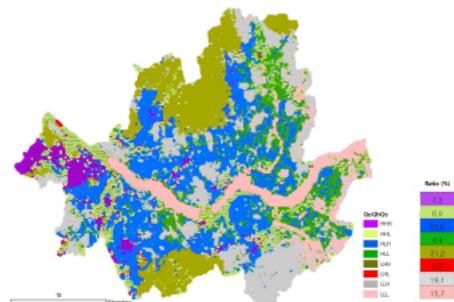


Figure 6. Nighttime Classification

야간 유형 중 가장 높은 비율을 차지한 열환경 양호 지역은 현열이 낮고 잠열, 저장열이 높은 유형(HLH)이다. 현열의 절대값이 가장 큰 지역이지만 음수이므로 열이 외부에서 많이 유입된다는 의미이다. 반대로 저장열은 절대값(79.9)만큼 지표에서 방출된다. 이 유형은 건축물과 불투수성 비율이 비교적 높은 지역으로 지표면 특성상 야간에 빠르게 냉각되어 현열의 유입이 많다.

복 요소비율을 비교해보면 LHH가 녹지율이 높고 인공지표면(불투수성비율, 건폐율, 도로비율)이 낮아 불투수성 표면율이 상대적으로 높았던 HHL이 주간에 저장되었던 열이 LHH보다는 높다(열저장 능력:아스팔트 포장 도로-1.94 MJ/m<sup>3</sup>K, 나지 -1.42 MJ/m<sup>3</sup>K) (Crevier, 2001). 따라서 야간에 방출되는 열이 상대적으로 작게 된다.

Table 3. Land surface ratio and Heat flux of Nighttime types

(Unit : Ratio, W/m<sup>2</sup>)

Type	Green space	Building	Impervious Surface	Wetland	Road	Latent heat	Sensible heat	Storage heat
HHH	0.2++	0.1++	0.6+++	0.03+	0.0+	18.9±4	-18.1±9	-76.6±15
HHL	0.1++	0.1++	0.5+++	0.1++	0.1++	19.7±2	-8.0±15	-129.8±21
HLH	0.1++	0.6+++	0.2++	0.0+	0.1++	19.2±2	-44.0±11	-79.9±12
HLL	0.2++	0.2++	0.3++	0.0+	0.3+++	16.9±3	-38.5±7	-117.2±11
LHH	0.9+++	0.03+	0.0+	0.0+	0.0+	5.4±2	-28.1±1	-73.1±5
LHL	0.3++	0.0+	0.3++	0.1++	0.2++	5.1±2	-28.2±1	-120.6±4
LLH	0.9+++	0.03+	0.04+	0.01+	0.02+	-4.9±6	-36.1±5	-85.9±8
LLL	0.0+	0.0+	0.0+	1.0+++	0.0+	-2.2±7	-37.5±5	-121.1±12

low level    middle level    high level

가장 낮은 비율(0.8)인 유형은 LHL로 열환경 개선필요 지역이다. 주간에 20%이상(그림 5)을 차지하여 두 번째로 높았던만큼 주간에 서울에는 개선필요지역이 많고 야간에는 개선이 필요한 지역이 감소한다. 야간의 개선필요 지역은 지상으로 방출되는 저장열이 많고(-120.6) 잠열이 적어 대기중에 현열이 상대적으로 많은 지역이다. 이 유형은 불투수성표면율이 비교적 높은 지역으로 지표면 특성상 주간동안 저장해둔 열의 대기 중 방출이 많다.

절대값의 크기(표3)를 비교해 보면, 유형 HHL인 지역이 상대적으로 가장 높아 저장열이 지표면 밖으로 많이 방출되는 것이고 LHH가 가장 낮아 적게 방출되는 것을 의미한다. HHL과 LHH의 피

한편, 야간의 현열, 저장열과 잠열이 모두 높은 지역인 유형 HHH는 공항 및 개활지이거나 나지이다. 이 지역은 불투수성표면율이 높고 수공간 비율이 낮으며 도로가 거의 없는 지역이다. 열의 구성을 살펴보면, 잠열이 비교적 높은 수치를 차지하고 현열과 저장열은 다른 유형에 비해 그 수치가 높지만 음수의 값(표3)을 갖는다. 이는 주간의 열의 흐름과는 반대로 현열은 격자셀의 열수치가 주변지역보다 낮아 외부로부터 열이 유입되는 것이고 저장열은 지표면 아래에서 밖으로 유출되고 있는 것이다(그림 6).

반면, 야간의 유형 LLL은 현열, 저장열, 잠열이 모두 낮아 순복사열이 상대적으로 낮은 지역이 집중된 지역으로, 수공간 비율이 높음에도 불구하고 잠열이 격자셀 외부로부터 유입이 된다. 또한

건축물 비율과 불투수성 표면 비율이 낮아 건축물 비율이 높은 지역보다 주간에 저장된 열이 적어 야간에 발열되는 현열이 작다. LLL유형은 주변으로부터 열을 흡수(음수)한다. 특히, LLL유형에서 저장열(음수가 지표면에서 대기중으로 방출되는 의미)은 지표면 밖으로 열을 방출하지만 절대치가 다른 유형에 비해 크게 방출된다(표3).

결과적으로 야간의 열분포를 살펴보면, 현열의 경우, 모두 음수를 지녀 해당 격자로 현열이 유입되는 현상을 나타내고 있다. 잠열의 경우, 2개의 유형(LLH, LLL)이 음수로 나타났고 이는 산림, 녹지, 수공간으로 구성되어 있으므로 열이 격자외부에서 안으로 유입된다는 의미이다. 잠열이 높게 나타난 곳은 4개의 유형(HHH, HLH, HHL, HLL)으로 녹지로 구성되어 있는 주간과는 달리 주로 시가지 지역으로 나타났다 이는 야간에 식물이 호흡작용을 하여 대기중의 수분을 물로 액화시킴으로써 에너지가 발생되기 때문이다.

## 2. 개선지역 도출 결과 및 특성

### 1) 열환경 개선 필요 지역(LHL) 선정

k-means 군집분석에 의한 열환경 개선지역의 유형화 작업에 의한 8가지 유형 중 개선이 필요한 유형은 상대적으로 잠열과 저장열이 낮고 현열이 상대적으로 높은 LHL 유형으로 앞서 정의한 바 있다. 이 유형의 토지피복 구성요소는 〈건폐율〉 〈불투수성표면 비율〉 〈도로비율〉 〈녹지율〉 〈수공간비율〉 순으로 나타났다. 평균 열수치는 잠열, 현열, 저장열 (20.1, 160.1, 107.5W/m<sup>2</sup>)이었다.

본 연구에서 도출된 개선 필요 지역의 세가지 열수치의 평균값은 기존 연구에서의 여름철 도시의 열수치 수치들인 잠열( 80W/m<sup>2</sup>), 현열 ( 150W/m<sup>2</sup>), 저장열 ( 120W/m<sup>2</sup>)과 비교했을 때,

현열이 조금 높고 잠열과 저장열은 낮다(Spronken-Smith, 2002).

### 2) 열환경 개선 필요지역의 주/야간에 따른 열적 변화 고찰

주간에서 야간으로 시간적 여건이 변함에 따라 태양 에너지의 변화로 공간의 열량도 변화한다. 그러나 시간에 따른 잠열, 현열, 저장열의 구성비 변화는 비단 시간에 의한 열량들의 자동적인 변화결과가 아닌 열수치 요소들에 영향을 미치는 변수들에서 기인한 차이가 있다고 볼 수 있다. 즉, 구성비 변화는 각 열량들의 변화 차이로 이어지므로 토지 피복요소와도 연관이 있다. 이에 구성비 변화에서 순복사량의 주야간의 변화량만큼 잠열, 현열, 저장열 또한 비례적으로 변화되어야 함에도 그렇지 않았다.

해당 유형인 LHL는 열량이 주간에 잠열 : 현열 : 저장열 = 1 : 8 : 5의 비율에서 야간에는 5 : 4 : 2 로 잠열이 많이 차지하는 구성으로 바뀌었다(표 4). 여기서 잠열과 저장열의 변화가 현열의 비율 변화보다 역동적임을 나타낸다. 시간이 흐름에 따라 녹지율이 90%인 곳에서 비교적 다량의 식물 증산작용에 따른 결과로 볼 수 있다(Williams, et al., 2015).

Table 4. Heat flux proportion rate by type  
(Unit: Ratio)

Type	Day(14:00)			Night(22:00)		
	Latent heat	Sensible heat	Storage heat	Latent heat	Sensible heat	Storage heat
HHH	0.16	0.36	0.48	0.42	0.35	0.24
HHL	0.18	0.47	0.35	0.46	0.40	0.15
HLH	0.27	0.27	0.46	0.44	0.31	0.24
HLL	0.45	0.27	0.28	0.47	0.35	0.18
LHH	0.06	0.44	0.50	0.41	0.34	0.25
<b>LHL</b>	<b>0.07</b>	<b>0.56</b>	<b>0.37</b>	<b>0.45</b>	<b>0.38</b>	<b>0.17</b>
LLH	0.06	0.32	0.62	0.41	0.35	0.24
LLL	0.09	0.46	0.45	0.45	0.37	0.18

야간시간대의 LHL은 8가지 유형들 중 수공간 비율이 가장 높고 그 외 건축물, 불투수성표면, 도로, 녹지율 비율이 모두 낮다(표4). 이는 열수지의 열들의 구성 변화 비율이 열환경에 영향을 주고 있기 때문이다.

본 연구에서 정의한 열환경 개선 필요지역은 열환경을 향상시키는 방법을 찾기 위하여 열수지를 바탕으로 한 토지피복요소를 고려한 기준을 찾아야 한다. 앞에서 언급했던 피복 종류를 포함한 공간 요소들의 측정치 평균을 사용하여 유형별 공간요소들의 범위를 산정한 방법(Stuart and Oke, 2012)을 활용할 수 있다. 본 연구에서 살펴본 유형별 토지피복 요소들의 측정치 평균을 열수지와 연관시켜볼 수 있다. 열환경에 공간적 유형을 달리하는 토지피복요소들과 열수지의 상관성을 갖고 있다(표 5).

Table 5. Regression Analysis of Latent heat, Sensible heat, Storage heat and Land Surface Element

Model	R	R Square	Standard error of the estimate				Sig.
			Adjusted R Square	F	mean square	df	
QE	.748	.560	34.23	.56	19600.18	4	0.0
QH	.727	.528	31.14	.53	17250.57	4	0.0
QS	.649	.421	46.27	.42	11215.55	4	0.0

3) 피복요소별 열수지 영향 최적비율을 통한 개선방향 제시

서울은 녹지와 수변이 많아서 열 환경이 양호한 지역으로 구체적으로 살펴보면 열개선지역인 LHL과는 반대인 잠열과 저장열이 높고 현열이 낮은 HLH유형이다. LHL 지역을 탈피하기 위해서는 낮에 HLH인 지역과 낮에는 LHL 지역이었으나 밤이면 HLH가 되는 지역의 피복 요소를 살펴볼

필요가 있다(표6).

Table 6. Daytime Land surface element ratio/Heat flux of LHL and HLH (Unit :W/m<sup>2</sup>)

Type	gr	bldg.	im	wt	rd.	M. Latent	M. Sensible	M. Storage
HLH	0.3	0.02	0.2	0.3	0.1	104	104	177
LHL	0.03	0.4	0.3	0.0	0.2	20	160	108

gr:green space, bldg:building, im:impervious, wt:wetland, rd:road

M. Latent : Mean latent heat  
M. Sensible : Mean sensible heat  
M. Storage : Mean storage heat

LHL유형의 주/야간 변화(그림 7)를 살펴보면 낮에 LHL 유형인 지역이 밤에 다른 유형들로 변화하였다. 이는 태양에너지의 변화로부터 기인하였으나 토지 피복에 의한 영향이라고도 할 수 있다.

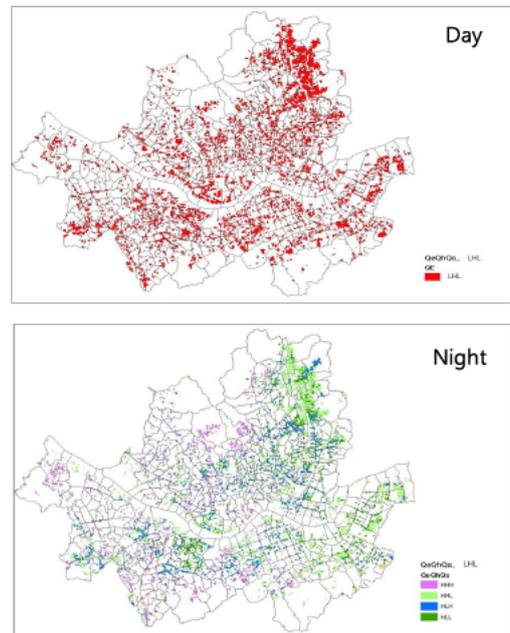


Figure 7. Day and night change of LHL

토지 피복의 영향을 배제할 경우, 태양에너지

의 감소에 따라 서울시의 열수지 열량들이 모두 일정한 비율로 감소하는 경향을 보이거나 적어도 낮의 유형이 밤까지 그대로 유지가 되었을 것이다. 그러나 야간의 유형별 열량변화를 살펴보면 낮에는 같은 유형에 속했던 지역들이 밤에는 다른 유형으로 변화되어 열수지의 구성 비율이 낮과는 다른 양상을 보였다(표 6).

또한 열수지 구성 비율 측면에서 살펴보면 열수지 중 현열이 44%, 잠열이 31%, 저장열이 24%로 현열이 대부분 공간적 더위와 연관된다. LHL지역을 개선시키기 위한 방안을 위해 반대의 열수지 구성비율을 가지고 있는 HLH 지역의 토지 피복 구성에서 녹지 비율과 수공간 비율이 8가지 유형중 격자셀의 60%를 차지할 만큼 높았고 건축물과 도로비율은 아주 낮았다. 낮 동안의 열수지의 구성비율 측면에서 HLH 지역은 LHL 지역과 비교해 볼 때, 상대적으로 잠열이 약 3배, 저장열은 0.2배 증가하고 이에 따라 현열이 약 0.5배로 감소한다(표6). 이는 주간에 수공간이 많은 HLH 지역이 LHL지역에 비해 보행자가 공간에서 받을 온도에 관여하는 열수치가 비교적 낮고 지표면 아래로 흐르는 열이 높아 주간에 비교적 쾌적한 공간이라고 할 수 있다.

결과적으로, 서울의 구도심과 부도심이 열환경 개선 필요지역으로 집중 분포되어 있다. 특히하게 강북구와 은평구의 시가지가 열환경 개선 필요지역으로 포함되었다. 이 지역은 불투수성 포장과 건축물 비율이 타 지역에 비해 상대적으로 높은 곳으로 고밀 주거지역이다.

주간에 잠열과 상관성이 높은 피복요소는 수공간이고 현열과 상관성이 높은 요소는 녹지인데 음의 상관관계에 있어 녹지가 많을수록 현열이 낮아진다. 현열과 마찬가지로 저장열에 많은 영향을 미치는 요소 또한 녹지율이다. 그리고 수공간이

많으면 잠열이 높아지고, 녹지가 적어지면 현열과 저장열이 낮아진다. 한편 밤 시간대에는 불투수성 표면비율이 높아지면 잠열이 낮아지며 건축물비율이 높아지면 현열이 높아지고 도로율이 높아지면 저장열이 높아진다.

불투수성표면이 야간의 잠열에 가장 많은 영향을 미쳤으나 불투수성표면이 커질수록 잠열이 낮아지게 된다. 또한 야간의 현열은 열환경 개선 필요지역을 제외하고는 상대적으로 변화가 심하지 않다.

여름철 열환경 개선 필요지역에서 토지피복을 통해 열환경이 양호한 지역으로 개선시키기 위해 앞서 언급한 양호지역의 토지피복 구성비율을 지향한다. 표7의 천공률은 열수지 요소들을 산정하기 위해 사용되었던 자료를 검토하여 양호지역, 개선필요지역 각각의 유형에 해당되는 평균값을 활용하였다. 천공률, 토지피복 요소, 열수지 요소의 범위는 해당 셀들의 표준오차를 통한 산출결과이다. 기본방향으로 제안된 양호지역으로 개선하기 위한 천공률, 토지 피복요소, 열수지 요소들의 비율들은 양호지역을 기준으로 개선지역에서 지향할 변화율이다.

앞서 명시한 열수지 요소들의 여름철 평균 수치(잠열 - 80W/m<sup>2</sup>, 현열 150W/m<sup>2</sup>, 저장열-120W/m<sup>2</sup>)들을 고려해보면, 개선지역에 대한 표준이 0.0 이하이므로 평균에서 크게 벗어난 수치가 없다고 봐도 된다. 따라서 개선이 필요한 지역의 천공률(SVF)은 0.57 이다. 양호한 지역은 천공률이 0.85로 많이 개방되어 있는 지역이다.

Table 7. Basic direction to improve thermal environment of type LHL (Unit : Ratio, W/m<sup>2</sup>)

Classification	HLH	LHL	Basic direction
SVF	0.85(±0.13)	0.57(±0.08)	preferable SVF : 0.3
Land cover	gr	0.4(±0.35)	0.03(±0.13) gr-min. 15% ▲
	bldg.	0.03(±0.07)	0.4(±0.11) bldg- 10% ▼
	im	0.2(±0.27)	0.3(±0.11) im-10% ▼
	wt	0.3(±0.41)	0.0(±0.01) wt-max. 30%▲
	rd	0.1(±0.15)	0.2(±0.11) rd-10%▼
Heat balance	Q <sub>e</sub>	103.6(±58.17)	20.1(±0.57) 1.Changing a composition ratio of land cover
	Q <sub>h</sub>	103.5(±13.65)	160.1(±24.51) 2.Need max. Q <sub>e</sub>
	Q <sub>s</sub>	177.3(±36.36)	107.5(±15.23) 3. Decrease Max. value of Q <sub>h</sub> 4. Need max. Q

\* Seoul ordinance of building coverage, floor area, 2017 commercial area 60%, residential area 40~60%, green 20%  
 \*\* R. A. Spronken-Smith, 2002  
 -SVF:Sky View Factor, gr:green space, bldg:building, im:impervious, wt:wetland, rd:road

기본방향(표7)에서 1) 천공률은 0.3정도 변화시킨다. 2)현열을 감소시키기 위한 녹지율을 10% 증가시키므로써 열환경을 개선시키는 도시립 조성 사업 및 식재계획을 필요로 한다. 3)불투수성표면 비율과 도로율은 10% 감소시킨다. 4)잠열을 높이기 위해 도시설계에서 수공간을 확장시킨다.

열환경 개선 필요지역은 열환경을 향상시키기 위하여 열섬 저감 현상을 유도하기에 유용한 열수지와 토지피복요소를 고려한 기준을 다음의 관계식으로 도출할 수 있다. 본 연구에서 얻어진 서울시 격자 셀의 자료를 바탕으로 회귀분석한 결과, 열수지 열들간의 관계식은 다음과 같이 나타났다(수식 2~4).

$$Q_e = 61.86 * gr - 5.71 * bd - 0.23 * im + 53 * wt - 4.04 * rd + 24.77 \quad (2)$$

$$Q_h = -47.08 * gr + 32.94 * bd - 114.32 * im$$

$$- 32.01 * wt - 58.21 * rd + 342.43 \quad (3)$$

$$\Delta Q_s = 44.61 * gr - 67.42 * bd + 90.80 * im + 62.86 * wt + 91.68 * rd + 199.09 \quad (4)$$

열환경 개선지역에서 토지 피복을 활용하여 양호한 지역으로 유도를 하려면 잠열, 현열, 저장열에 대한 토지 피복 5가지의 영향력을 알아보는 과정이 필요하다. 이에 열수지 요소와 피복요소들의 관계식을 정립하고자 R을 통한 회귀분석을 시행하여 피복 비율별 각 열수지 요소에 미치는 영향을 계량적으로 살펴보았다.

열환경 개선지역의 주간에 잠열은 녹지(61.86)와 수공간(53)이 증가할수록 높아지고 계수의 절대값이 가장 큰 녹지의 영향이 가장 많이 받고 그 값이 작은 불투수표면의 잠열에 대한 영향력이 가장 작다. 건폐율, 도로비율, 불투수성표면 비율이 증가할수록 잠열은 감소한다(수식2). 현열은 건폐율이 증가하면 열의 수치가 증가하고 4가지 피복요소인 녹지, 수공간, 불투수표면, 도로 면적 비율이 증가하면 반대로 현열은 감소한다. 불투수표면 비율이 가장 큰 영향을 미치고 건폐율이 현열의 변화에 영향력이 가장 작다(수식3). 저장열은 도로 면적 비율에 가장 큰 영향을 받고 녹지율로부터 5가지 피복요소중 가장 작게 영향을 받는다. 건폐율 비율이 감소하면 증가하고 나머지 4가지 요소인 도로비율, 불투수성표면 비율, 수공간비율, 녹지율이 증가하면 열 또한 상승한다(수식4).

결국 열환경 개선지역에서 잠열과 저장열이 높고 현열이 작은 양호한 지역으로 전환하려면 토지 피복 요소 중 정해진 면적만을 변경시킬 수 있을 경우, 잠열을 증가시키기 위해서는 수공간 보다는 녹지면적을 증가시키고 저장열을 증가시키기 위해서는 도로면적을 증가시키고, 현열을 감소시키기 위해서는 빌딩면적을 낮추고 불투수성 표면을 증가시키는 것이 효과적이다.

위의 식으로 유형별 열수지 열량들을 산정하여 도시설계를 위한 지구단위계획이나 주거환경정비사업계획과 같은 도시계획사업에 적용할 수 있는 열환경 개선의 기준적 지표로 활용할 수 있다.

#### IV. 결 론

열수지를 구성하고 있는 잠열, 현열, 저장열과 토지 피복 구성비율 자료를 활용하여 서울시 열환경을 공간적 유형으로 구분할 수 있었다. 그 결과 8가지의 유형 중 상대적으로 잠열과 저장열이 낮고 현열이 비교적 높은 지역, 즉 열환경을 개선해야 할 (LHL)지역을 선정하였다. 이 지역은 다른 7가지 유형 지역에 비해 녹지율과 수공간 비율이 낮았고 건폐율이 가장 높았으며 나머지 인공지반인 불투수성표면과 도로 비율이 다음으로 높았다. 또한 열수지 구성 비율 측면에서 살펴보면 현열이 가장 높았다. 따라서 LHL지역을 개선시키기 위한 열 양호지역의 열수지 구성 비율인 HLH 지역은 수공간과 녹지율이 가장 높았고 한강과 같은 수계 이외에도 공항과 같은 나지가 해당되었다. 다음으로 불투수성비율, 도로비율, 건폐율과 같은 인공지반은 낮은 비율을 지닌 지역으로 나타났다. 열수지 구성비율을 통해 LHL에서 HLH 유형으로 전향하기 위해서는 100 × 100 m의 규모에서 약 30% 이상의 녹지율 및 수공간 비율과 20% 이하의 불투수성표면비율, 10% 이하의 도로 비율, 2% 이하의 건폐율이 LHL유형인 지역을 개선할 수 있는 최소한의 준거가 될 수 있다. 아울러 도시설계시, 활용할 수 있는 열환경 개선 필요지역을 상징하는 근거를 마련할 수 있었다.

또한, 도시계획사업에서 도출될 수 있는 열환경 개선 단위공간을 설정하면서 열수지 열들간의 관계식을 바탕으로 열수지 개선의 기준적 지표로 제시할 수 있다.

본 연구는 산정식을 통한 열 수치들을 고려한 열 환경 개선 필요지역을 선정하기 위해 유형화하고, 열환경 개선을 위한 토지피복에 따른 복사열의 공간유형을 도출하면서 토지피복요소와 열수지 열들간의 관계를 실증적으로 계량화한 연구이다. 그러나, 서울시의 실질 관측 기상 데이터를 입력 변수로 하여 서울시내의 보행공간에서의 실질적인 열수치를 산출하는데 한계가 있었다. 그 이유는 관측장비가 주로 지상 3층 이상의 건축물 옥상에 설치되어 얻어진 기상자료이므로 도시 협곡 안의 지역적인 공간특성과 열수지 관계를 구명하는데 부족했다.

또한 종횡비와 같은 도시 표면의 입체적인 공간적 요소를 고려하지 않고 열에 대한 피복의 영향만을 고려한 연구라는 것에 한계가 있었다. 향후 연구과제는 열환경 개선 필요지역으로 선정된 LHL 지역에서 토지피복 비율의 변화와 열 유형의 비율의 변화에 적절한 시나리오 제시와 열수지에 따른 비율을 상정할 수 있다.

인용문헌

References

1. 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.
2. 김현욱·윤종민, 2012. “도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향:경기도 일산 신도시를 중심으로”, 「대한원격탐사학회」 28(2): 203-214.  
“Effect of the Urban Land Cover Types on the Surface Temperature”, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(2): 203-214.
3. 송봉근·박경훈, 2011. “도시기후 형성 요소를 고려한 공간유형 분류 : 창원시를 대상으로”, 「한국환경영향평가」 20(3): 299-311.  
Song, B., Park, K., 2011, “The Classification of Spatial Patterns Considering Formation Parameters of Urban Climate”, *Environmental Impact Assessment*, 20(3): 299-311.
4. 여인애·이정재·윤성환, 2012. “도시의 건폐율 및 용적률이 도시기후에 미치는 영향 분석”, 「한국태양에너지학회」 29(3): 19-27.  
Yeo, I., Yee, J., Yoon, S., 2012, “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.
5. Allen, R. G., Pereira L. S., Raes, D., Smith, M., 1998, “Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-”, *FAO Irrigation and drainage paper*, 56: 1-15.
6. Bennett, A., 2004, “Heat Fluxes From Street Canyons”, *MSc Applied Meteorology dissertation*, The University of Reading. 1-71.
7. Clothier, B. E., Clawson, K. L., Pinter, Jr., P. J., Moran, M. S., Reginato, R. J. and Jackson, R. D., 1986, “Estimation of Soil Heat Flux from Net Radiation During the Growth of Alfalfa”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 37(1986): 319-329.
8. Crevier, L. -P. and Delage, Y., 2001, “METRO: A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada”, *American Meteorological Society*, 40: 2026-2037.
9. Geletic, J., Lehnert, M., Savic, S., Milosevic, D., 2018, “Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in local climate zones of the city of Brno, Czech Republic”, *Science of the Total Environment*, 624(2018): p. 385-395.
10. Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R., 1991, “An Evapotranspiration-interception model for urban areas”, *Water Resources Research-AGU Journal*, 27(7): 1739-1755.
11. Holtslag, A. A. M., van Ulden, A. P., 1983, “A Simple Scheme for Daytime Estimates of the Surface from Routine Weather Data”, *Journal of climate and Applied Meteorology*, 22(4): 517-529.
12. Jain, A. K., 2010. “Data Clustering : 50 years beyond k-means”, *Pattern Recognition Letters*, 31(8): 651-666.
13. Janssens, W., De Pelsmacker, P., Wijnen, K., Van Kenhove, P. 2008. “Marketing research with SPSS”. *Upper Saddle River, NJ* : Prentice Hall.
14. Janzing, D., Mooij, J., Shang, K., Lemeire, J., Zscheischler, J., Caniusis, P., Steudel, B., Scholkopf, B., 2012. “Information-geometric approach to inferring causal directions”, *Artificial Intelligence*, 182(183): 1-31.
15. Kato, S., Yamaguchi, Y., 2007, “Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data”, *Remote Sensing of Environment*, 110(1): 1-17.
16. Kjærulff, T. M., Ersbøll, A. K., Gislason, G., Schipperijn, J., 2016, “Geographical clustering of incident acute myocardial infarction in Denmark: A spatial analysis approach”, *Spatial*

- and Spatio-temporal Epidemiology, 19: 46-59.
17. Kothe, S., Dobler, A., Beck, A., Ahrens, B., 2011 "The radiation budget in a regional climate model", *Climate Dynamics*, 36(5-6): 1023-1036.
  18. Kotteck, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006 "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated", *Meteorologische Zeitschrift*, 15:259-263.
  19. Li, W., Cao, Q., Kun Lang, K., Wu, J., 2017. "Linking potential heat source and sink to urban heat island Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature", *Science of The Total Environment*, 586: 457-465.
  20. Lindberg, F. and Grimmond, C. S. B., 2011. "The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation", *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3-4): 311-323.
  21. Loridan, T. and Grimmond C. S. B., 2011. "Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme(LUMPS): Longwave Radiation Parameterization and Seasonality-Related Development", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50: 185-202
  22. Martines, A. T., Ostos, E. J., 2005. "Surface energy balance measurements in the México City region: a review", *Atmósfera*, 18(1): 1-23.
  23. Masson, V., Grimmond, C. S. B., Oke and T. R., 2002. "Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct measurement from Dry Distrits in Two Cities", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41: 1011-1026.
  24. Offerle, B., Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R., 2003. "Parameterization of Net All-Wave Radiation for Urban Areas", *American Meteorological Society*, 42: 1157-1173.
  25. Spronken-Smith, R. A., 2002, "Comparison of Summer-and Winter-time Suburban Energy Fluxes in Christchurch, New Zealand", *International Journal of Climatology*, 22: 979-992.
  26. Sobstyl, J. M., Emig, T., Abdolhosseini Qomi, M. J., Ulm, F.-J., and Pellenq, R. J. -M., 2018. "Role of City Texture in Urban Heat Islands at Nighttime", *Physical Review Letters*, 120(10): 1-6.
  27. Stewart, I. D., Oke, T. R., 2012. "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900.
  28. Williams, I. N., Torn, M. S., 2015. "Vegetation controls on surface heat flux partitioning, and land atmosphere coupling", *Geophysical Research Letters. An AGU Journal*, 42(21): 9416-9424.
  29. Velmurugan, T., Santhanam, T., 2010, "Computational Complexity between k-means and K-Medoids Clustering Algorithms for Normal and Uniform Distributions of Data Points", *Journal of Computer Science*, 6(3): 363-368.
  30. Voogt, J. A., Grimmond, C. S. B., 2000, "Modeling Surface Sensible Heat Flux Using Surface Radiative Temperatures in a Simple Urban Area", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 39(10): 1679-1699.
  31. Zscheischler, J. Mahechaa, M. D., Harmelingb, S., 2012. "Climate classifications: the value of unsupervised clustering", *Procedia Computer Science*, 9(R1-R2) ; 897-906.
  32. Zhou, Z., Wang, L., Lina, A., Zhang, M., Niub, Z., 2018. "Innovative trend analysis of solar radiation in China during 1962-2015", *Renewable Energy*, 119: 675-689.

Appendix

격자셀(100m × 100m)별 순복사열 산정 과정 (심사중)

대기권 내의 단파복사량(직달단파, 산란단파)은 Allen(1998)의 단파산정식과 Cloud Radiation Model(CRM)모형을 이용하여 산정하였으며, 장파 복사량은 Offerle(2003)의 NARP 모형을 이용하여 산정하였다(그림 A의 ①).

대기권에서 입사 및 방출 되는 단파와 장파복사량은 도시 협곡 내에서 건물의 그림자(shading), 하늘이 열려 있는 정도(천공률, SVF), 반사율(albedo) 등의 복합적인 영향을 받아 순단파복사량( $S_n$ )과 순장파복사량( $L_n$ )의 형태로 남으며, 이를 합산한 값이 도시공간에 남아 있는 열의 총량, 순복사량(Net radiation,  $Q_n$ )이다(수식 1, 그림 A의 ②).

$$Q_n = S_n + L_n \quad (1)$$

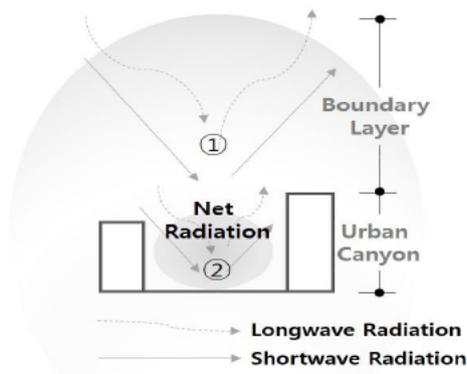


Figure A. Urban Canyon and Net Radiation 1

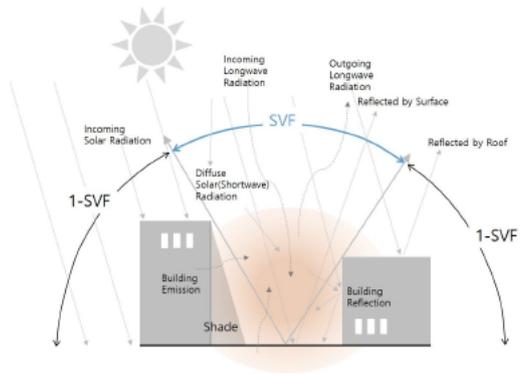


Figure B. Urban Canyon and Net Radiation Concept 2

순단파복사량( $S_n$ )은 건물의 그림자가 없는 지역 ( $1 - Shade_{ratio}$ )에 도달하는 직달일사량( $S_{dir}$ )과 하늘이 열린 정도(SVF)에 비례하는 산란일사량( $S_{diff}$ ), 건물에 입사되는 단파복사량( $S_{dir} + S_{diff}$ ) 중 건물에 반사되어( $\alpha_b$ ) 그림자가 없는 면적에 도달하는( $1 - Shade_{ratio}$ , 건물이 보이는 정도는  $1 - SVF$ ) 단파복사량을 합한 다음, 지표면에 반사되는 비율( $\alpha$ )에 해당하는 양을 제외한 것이다(수식 2, 그림 B).

$$S_n = ((1 - Shade_{ratio}) \times S_{dir} + SVF \times S_{diff} + (1 - SVF) \times (1 - Shade_{ratio}) \times (S_{dir} + S_{diff}) \times \alpha_b) \times (1 - \alpha)$$

수식(2)

순장파복사량( $L_n$ )은 하늘이 열린 정도(SVF)에 비례하는 장파복사량과( $LW_i$ ), 건물에 도달하는 장파복사량( $LW_i$ )과 단파복사량에서 장파복사로 전환되는 양( $f_b \times (S_{dir} + S_{diff})$ ) 중 건물에 흡수되었다가( $1 - \alpha_b$ ) 지표면에 도달하는 양( $1 - SVF$ )을 합한 다음, 방출 장파복사량( $LW_o$ )을 제외한 것이다(수식 3, 그림 B).

$$L_n = [LW_i \times SVF + (LW_i + f_b \times (S_{dir} + S_{diff})) \times (1 - \alpha_b) \times (1 - SVF)] - LW_o \quad (3)$$

이와 같은 과정을 통해 산정된 순복사량( $Q_n$ )을 도시의 피복과 같은 공간적 특성과 연계하면, 다시 현열(Sensible heat,  $Q_h$ ), 잠열(Latent heat,  $Q_e$ ), 저장열(Storage heat,  $\Delta Q_s$ )로 구분할 수 있다(수식 4).

$$Q_n = Q_h + Q_e + \Delta Q_s \quad (4)$$

우선, 저장열은 지표면에 침투되는 열로서, 순복사열 중 비율이 가장 낮으나(S. Kato, et al., 2007) 지표면 온도에 영향을 미친다. 특정 공간 내에 재질  $i$ 가  $I$ 개 존재하며, 각 면적 비율이  $f_i$ 이라고 할 때, 공간 내 순복사량( $Q_n$ ), 공간 내 순복사량의 변화량( $\Delta Q_n$ ), 재질별 경험적 상수항( $a_{1i}$ ,  $a_{2i}$ ,  $a_{3i}$ )을 이용하여 산정할 수 있다(OHM모델; Grimmond, 1991; 수식 5)

$$\Delta Q_s = \sum_{i=1}^I f_i \times (a_{1i} Q_n + a_{2i} \Delta Q_n + a_{3i}) \quad (5)$$

다음으로 현열은 사람이 느낄 수 있는 열로서 대기온도에 가장 큰 영향을 미치며 열 쾌적성과는 관련성이 높다. 잠열은 대기온도에 영향을 미치지 않으나 에너지 상태를 변화시키는 열로서 녹지 및 수 공간에서 많이 방출된다. 현열( $Q_h$ )과 잠열( $Q_e$ )은 순복사량에서 저장열을 제외한 열( $Q_n - \Delta Q_s$ )에서 건습상수( $\gamma$ ), 포화수증기압 기울기( $s$ ), 보정상수( $\alpha, \beta$ )를 이용하여 분배된다(Penman-Monteith Approach, 수식 6-7).

$$Q_e = \frac{\alpha}{1 + (\gamma/s)} (Q_n - \Delta Q_s) + 20 \quad (6)$$

$$Q_h = \frac{(1 - \alpha) + (\gamma/s)}{1 + (\gamma/s)} (Q_n - \Delta Q_s) + 20 \quad (7)$$

Date Received	2018-07-31
Reviewed(1 <sup>st</sup> )	2018-09-25
Date Revised	2018-10-10
Reviewed(2 <sup>nd</sup> )	2018-11-05
Date Accepted	2018-11-05
Final Received	2018-11-26