

## AWS 데이터를 활용한 도시열섬 분포 및 강도의 군집분석을 통한 취약지역 도출\*

- 2005.03~2020.02 사이의 서울시 및 주변 지역 43개 지점을 대상으로 -

배웅규\*\*, 박세홍\*\*\*

### Deriving heat island vulnerable areas according to changes in heat island distribution characteristics and strength cluster analysis\*

Bae woong-kyoo\*\*, Park se-hong\*\*\*

**요약** : 최근 서울시는 도시 열섬현상의 가속으로 폭염, 열대야 일수가 길어지고, 온열 환자 수도 지속 증가하는 등 그 피해가 현실화하고 있다. 이 연구는 서울시를 대상으로 최근 15년 중 3개 연도를 대상으로 열섬 지도를 제작하여 열섬의 분포 및 강도 변화를 규명하고, 열섬 취약지역을 도출하였다. 첫째, 열섬 지도를 제작한 결과, 지역 특성에 따라 온도 분포가 차이가 있고 평균기온도 지속 상승하였으며, 고온지역 온도는 상승하고 면적은 감소하여 집중화된 것으로 분석되었다. 둘째, 열섬 지도에서 도출한 서울시 내 최대 열섬 폐곡선의 기온은 높아지고, 면적은 감소하며, 동서로 양분되며, 폐곡선 내 고온 핵의 개수는 증가하는 것으로 밝혀졌다. 셋째, 서울시 열섬 강도는 2005년도에서 2019년도까지 0.10℃ 상승하였으며, 지점별 열섬 강도 산출 결과 2005년도 영등포, 2012년도 중랑, 2019년도 송파지점이 최고 강도 지점으로 나타났다. 넷째, 열섬 강도 값의 행정동 단위 공간군집분석을 실시한 결과, 열섬 취약지역 면적은 점점 감소하지만, 열섬 강도 평균값이 증가하여 더 집중화되는 경향이 나타났다. 이 연구는 서울시 열섬현상의 변화를 정량적으로 분석하여, 열섬완화 등 열 환경 측면의 기후변화에 적응을 할 수 있는 기초자료로서 의미가 있다.

**주제어** : 폭염, 도시열섬, 열섬지도, 열섬강도, 자동기상측정망, 열섬취약지역

**ABSTRACT** : Recently, due to the acceleration of the urban heat island phenomenon, the effects of heat waves and tropical nights are getting longer in Seoul, and the number of patients suffering from heat fever is continuously increasing. The purpose of this study is to reveal changes in the distribution and intensity of heat islands by making a heat island map for 3 of the last 15 years for Seoul, and to derive heat island vulnerable areas. First, after producing a heat island map, the study analyzed that there was a difference in temperature distribution based on the characteristics of areas, the average temperature continuously increased, and the temperature of the high-temperature regions increased while the area reduced and centralized. Second, the greatest looped curve of heat island within Seoul deduced by the heat island map showed increasing temperature, reduced area, caused bisection between west and east, and the number of the thermal dome within the looped curve increased. Thirdly, the intensity of heat island in Seoul increased by 0.10℃ from 2005 to 2019, and as a result of heat island intensity by points, the points with the best intensity were Yeongdeungpo in 2005, Jungnang in 2012, and Songpa in 2019. Fourth, after conducting a spatial clustering analysis in the Hangeong-dong unit for the heat island value, the area of the heat island vulnerable area gradually reduced, but the average value of the heat island intensity showed tendencies of increase and centralization. This study is meaningful as basic data that can quantitatively analyze changes in the heat island phenomenon in Seoul and adapt to climate change in terms of heat environment such as heat island mitigation.

**KeyWords** : Heatwave, Urban Heat Island, Heat Island MAP, UHI Intensity, AWS, Heat Island Vulnerable Area

\* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019R1A2C1011102).

\*\* 중앙대학교 사회기반시스템공학부 도시시스템전공 교수(Professor, Dept. of Urban Design and Studies Chung-Ang Univ.), 교신저자 (E-Mail: baegogh@cau.ac.kr, 02-820-5849)

\*\*\* 중앙대학교 토목공학과 도시설계 및 계획 전공 석사과정

## I. 서론

### 1. 연구의 배경과 목적

최근 세계적인 기후변화로 곳곳에 폭염 등 이상 기상 현상이 빈번해지고 심화되었다. 또한, 광범위한 ‘열돔 현상’이 현실화되면서 도시지역을 중심으로 열섬현상 또한, 심화됨에 따라 현실적인 도시문제로 자리 잡고 있다. 도시지역을 중심으로 가중되고 있는 “도시 열섬”은 주변 전원지역보다 도시지역에서 대기와 지표면 온도가 더 높게 나타나는 현상을 말한다(J.A Voogt, 2003). 이에 따라 폭염과 열대야가 가중되고, 대기 등 도시환경도 악화되어 도시민 생활과 건강에도 악영향을 미치고 있어 많은 도시로 하여금 이에 대한 심각성을 인식하고 대응에 관심을 기울이고 있는 상황이다.

우리나라 평균 외기온도는 2019년대에 13.5℃로 1960년대보다 1.1℃ 상승하였으며(서울열린데이터광장, 2019), 연중 일 최고 기온이 30℃ 이상인 열대일 수가 1970년 이후 지속 증가하는 추세에 있다(서울연구원, 2010). 우리나라는 2018년 온열 질환자 수가 2016년 대비 전국적으로는 2.1배, 서울은 3.7배 증가하고 있다. 이는 폭염이 온열질환 뿐 아니라, 사망 등 대규모 인명피해를 입힐 수 있는 기상재해이며, 점차 악화되고 있다는 점에 주목해야 한다. 또한, 도시생활의 쾌적도가 크게 악화되면서 도시 활동이 위축되고, 에너지 소비가 가속화됨에 따라 더 쾌적한 도시환경 조성에 따른 사회적 요구도 증가하고 있다.

최근 고온지역이 서쪽 내륙과 서울을 비롯한 수도권에서 나타나며, 서울은 ‘열섬효과’가 더해지며

다른 지역에 비해 기온이 더 많이 상승하였다. 2021년 기상청의 서울기상관측소 측정값에 따르면, 서울 남쪽과 북쪽이 최대 1.9℃, 서쪽과 동쪽의 기온편차는 1.6℃의 차이를 보였다. 이와 같이 서울은 구별 지역적 특성에 따라 온도 편차가 있으며, 공원, 산 등 녹지나 수변공간과 토지이용 등 도시 환경적 특성에 따라 기온차가 다르게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

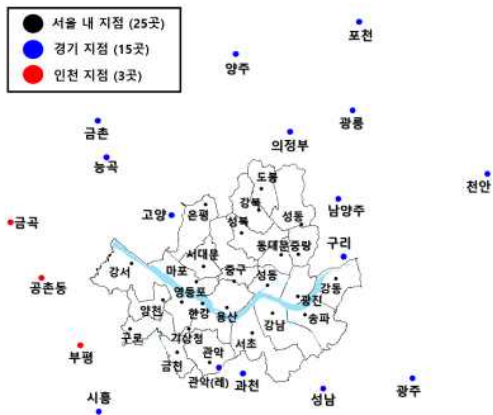
현재 서울시 정부는 우리나라의 열섬 심각성을 파악하고, 도로온도 저감, 녹화사업, 폭염저감시설 등 기후변화에 대한 대책을 내놓고 있다. 이러한 도시 열섬현상에 대응하여 시민의 재산과 건강을 지키기 위해 도시계획 및 설계적 방안을 마련하기 위해서는 더 정확한 도시 열섬 분포와 강도를 분석하고 그 취약지역을 도출하는 등 지역 맞춤형 대응이 필요한 현실이다. 따라서 이 연구는 서울시의 열섬 분포변화를 시계열적으로 연구하여 향후 대응을 위한 기초자료를 마련하기 위해 다음과 같은 목적을 갖는다. 첫째, 자동기상측정망(Automatic Weather System, AWS) 기온데이터를 활용하여 서울시의 최근 15년 내 3개 연도에 대한 열섬 지도를 제작한다. 둘째, 이를 기초로 서울시의 도시 열섬 구조 및 분포변화를 비교한다. 셋째, 서울시 내외의 기상 측정 자료를 활용하여 열섬 강도 산출하여 그 변화를 비교 분석한다. 넷째, 앞서 도출된 연구 결과를 기초로 군집분석을 실시하고 이를 근거로 열섬 취약지역을 도출하고자 한다. 다섯째, 위의 결과에 기초하여 향후 열섬 대응을 위한 시사점을 마련하고자 한다.

## 2. 연구의 범위와 방법

### 1) 연구 범위

공간적 범위는 한강이 가로지르며 분지형태를 가진 서울시(605.2km<sup>2</sup>, 25개 구, 425개 동)를 대상으로 한다. 시간적 범위는 2005년 3월부터 2020년 2월로 하며, 동일 간격으로 특성 분석을 위해 1년 단위로 3개년(2005년 03월~2006년 02월, 2012년 03월~2013년 02월, 2019년 03월~2020년 02월)을 선정하였다. 내용적 범위는 서울시 및 수도권 지역 43개 자동기상측정망(Automatic Weather System, AWS)의 연평균 기온데이터를 활용하여 열섬 지도 제작과 열섬의 분포특성과 및 그 변화를 분석하고, 열섬 강도 산출하여 이에 대한 공간 군집분석을 통해 열섬 취약지역으로 도출하는 것이다(그림 1).

〈그림 1〉 연구대상지와 자동기상관측 지점위치



\* 현충원지점은 2012년 11월부터 관측되어 분석에서 제외

### 2) 연구의 방법

먼저, 문헌고찰을 통해 열섬현상의 원인과 문제점을 정리하고, 2010년 이후 열섬 관련 국내 학술연구자료(www.riss.kr)를 검토하여 연구 방향을 설정하였다. 열섬 지도 제작 및 열섬 강도 산출은 서울기상자료개방포털(<http://data.kma.go.kr>)기온 데이터를 ArcGIS프로그램(ArcMap 10.8.1) Spline 공간보간법<sup>1)</sup>을 사용하며, 이 지도를 기준으로 열섬 형태 및 분포변화, 열섬 면적변화, 열섬 강도를 산출하고 공간군집분석(Getis-Ord Gi)을 통해 열섬 취약지점을 도출하고자 한다.

## II. 서울시 도시 열섬 현상과 선행연구 검토

### 1. 도시 열섬 개념과 과제

“도시 열섬”은 기온이 주변 교외 지역에 비해 높게 나타나는 현상을 말한다(한국기상학회, 2013). 열섬 현상은 도시의 물리적인 구조물과 그 에너지에서 파생되는 폐열 및 대기오염 물질의 상호작용에 의해 변형된 도시기후라 정의하고 있다(세계보건기구, 2016). Howard는 런던 도시지역의 야간 기온이 주변 교외 지역보다 약 2.1℃ 더 높다는 것을 발견하고 처음으로 도시 열섬 현상을 규명하였다(Mills G, 2008). 도시와 그 주변 지역의 온도분

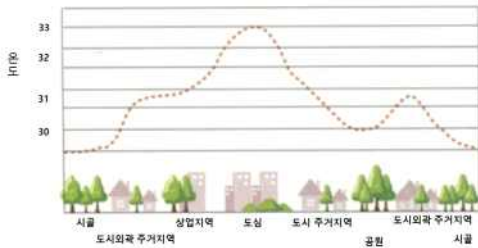
1) Spline 공간 보간법은 정확도 측면에서 높은 신뢰성을 보이고, 미측정 지점에 대해 비교적 정확한 예측 값을 도출하고, 급변하거나 일반화가 적은 추정 값을 보여주는 방법으로 사용에 적절하다. 작성 대상 지역 외부로 충분한 실측 지점이 확보되지 않는 경우 가장자리에서는 실측값의 범위를 초과하는 농도 분포를 산출할 수 있으므로 유의해야 한다(국립환경과학원, 2018).

포를 보면, 빌딩이 밀집된 도시 중앙부의 온도가 높고, 녹지가 많은 도시 외곽으로 갈수록 온도가 떨어지는 현상을 보인다(그림 2).

도시 열섬의 주요 원인으로 자동차 운행과 냉난방 장치 가동에 의한 인공 열 공급, 아스팔트나 콘크리트와 같은 불투수층 확대에 의한 지표면 보온 효과 등을 꼽을 수 있다. 그리고 도시화로 인한 녹지 감소를 들 수 있다. 기존 산림 또는 녹지는 증산 작용을 통해 온도 완화 및 일정 온도 유지에 도움을 주지만, 가속화된 도시화로 인해 줄어드는 녹지 면적은 온도 완충 기능을 상실하고, 도시 열섬 현상을 가속하는 요인이 된다.

〈그림 2〉 도시와 교외의 일반적인 기온분포

출처: 명수정(2010)



## 2. 서울시 열섬 관련 현상 기후 특징

서울시의 2000년부터 2020년까지 기후 평년값에 따르면 연평균 기온은 약 12.89℃, 평균풍속은 2.3m/s, 연평균 72%, 강수량은 1401.4mm로 1971년부터 2000년까지 기후 평년값인 연평균 기

온 12.2℃, 평균풍속 2.4m/s, 연평균 습도 67%, 연평균 1,344mm에 비해 모두 상승하였다(기상자료개방포털, 2020). 최근 기후를 살펴보았을 때, 2018년 서울시의 최고 기온은 39.6℃로 11년 기상관측 역사상 최고기록이었다. 기상청은 기후변화로 인해 서울시의 최고 기온이 21세기 후반에는 5.2℃까지 더 상승할 것으로 전망하였다. 이에 따라 전국 대부분 지역에 폭염 특보가 발효된 가운데 서울시는 2011년부터 지난해까지 10년간 폭염<sup>2)</sup>과 열대야<sup>3)</sup> 발생일이 14.0일로 과거 48년 평균인 10.1일보다 약 3~4일 더 증가했다는 분석이 나왔다. 폭염 일수 분석 결과, 2018년이 31.0일로 1위, 1994년 29.6일, 2016년 22.0일로 나타났다(그림 3).

최근 10년간 이러한 폭염현상의 증가와 함께, 열대야 빈도 또한 늘어난 것으로 분석하였다. 2018년은 서울시 열대야 지속일 수가 26일로 1973년 이래 최장기간을 기록하였다. 과거 8년 동안 평균 폭염 일수가 5.7일이고, 2010년대(2011~2020년)에는 9.0일로 크게 증가하였다. 폭염과 열대야는 도시 열섬과 상관성이 매우 높다고 설명된다(기상청, 2020). 이러한 폭염은 열사병과 일사병 등 온열 질환을 유발해 사망위험을 높인다. 〈그림 4〉를 보면, 실제 폭염 일수가 가장 많았던 2018년 온열 질환자가 4,526명으로 나타나며, 폭염 일수와 온열 질환자 숫자는 비례관계를 보인다.

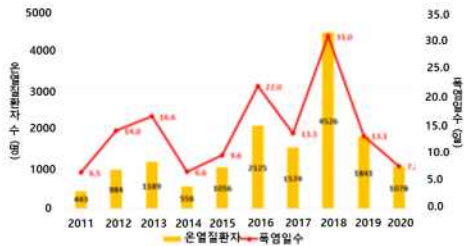
2) 폭염은 일 최고 기온이 33℃ 이상일 경우를 말하며, 폭염주의보는 33℃ 이상의 상태가 2일 정도 지속될 것으로 예상될 때 발령되며, 폭염경보는 일 최고 기온이 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것을 예상될 때 발령된다.

3) 열대야는 밤 동안 최저기온이 25℃ 이상을 유지하는 것을 말한다.

〈그림 3〉 1973~2020년 연별 폭염과 열대야 일수  
출처: 기상청(2020)



〈그림 4〉 연도별 폭염 일수와 온열 질환자 수  
출처: 질병관리청(2020)



### 3. 선행연구 검토 및 차별성

관련 문헌 및 연구 자료를 수집, 분석한 결과 도시공간의 열섬 관련 선행연구는 다음과 같이 3가지로 크게 분류할 수 있다.

첫째, 온도 데이터 분석을 통해 열섬 변화를 분석한 연구이다. 김용진(2011)은 서울시 AWS를 활용하여 날씨에 따른 도시 열섬 현상 요인을 분석하였다. 그 결과, 맑은 날의 요인은 고도, 풍속, 녹지면적이, 흐린 날은 건축물 복사열이 도시 열섬 현상의 심화 요인으로 나타났다. 오진우(2020)는 서울시 AWS 데이터를 활용하여 2007~2019년 기온 데이터를 시간별, 공간별로 분석하여 도시 열섬 현상에 영향을 주는 변수와 상관관계를 분석하였다. 이를 바탕으로 도시 열섬 현상을 예측하는 딥러닝 예측모델을 개발하여 도시 열섬 현상에 미치는 요

인을 확인하였다. 제민희(2018)는 폭염이 극심했던 날을 선정하여 AWS 데이터를 구축하여 시간대별 온도 표준편차와 지점별 전체자료의 온도 표준편차를 도출하였다.

둘째, 열섬 강도 산출 방법 및 열섬 강도를 통한 공간적 특성을 분석한 연구이다. 김유진(2012)은 서울의 시간별 기온자료(AWS)를 사용하여 기상조건(풍속, 운량, 강수량)에 따른 열섬 강도 특성을 파악하였다. 열섬 강도는 교외지역(양평, 이천, 동두천)기온차를 이용해 산출하였다. 이를 통해 서울 서남부지역과 중앙부, 그리고 동남부에서 주로 열섬 현상이 발생함을 밝혔다. Kim and Baik (2003)은 2001년 3월~2002년 2월 연평균 및 계절별 열섬 변화를 AWS 자료로 확인하였다. 교외지역(사릉, 능곡, 고양) 평균지점과 서울시 내 지점의 차이를 열섬 강도로 선정하여 서울시의 도시열섬 구조를 연구하였다. 이 연구 방법을 기초로 구해정(2007)은 2006년 3월~2007년 2월 열섬변화를 2001년도와 비교하여 양천, 영등포 등의 서쪽 중심 지역, 용산 그리고 송파 및 광진구를 중심으로 동남지역에서 크게 확장됨을 밝혀냈다. Oke(1973)에 의하면 열섬 강도  $\Delta T$ 는 도시 내외의 최대 기온차로  $\Delta T_{u-r} = T_u(\max) - T_r(\min)$ 로 표현했다. 田宮·大山(1981)에 따르면 연구대상지와 주변지역에서 여러 지점을 선택하여 평균값을 산출하여 열섬 강도를 구하는 방법을 사용하였다. 이 방법에서 얻은 열섬 강도는 Oke(1973)의 산출 법에서 얻은 값보다 작은 편차를 보였다.

셋째, 기온 데이터의 핫스팟<sup>4)</sup> 분석을 통해 열섬취약지역을 도출 및 관리제도에 관한 연구이다. 조혜민 외(2019)는 2014년 위성 자료 대기 온도를 활용하고, 행정동별 사회경제특성과의 공간적 자

기상관성을 분석하여 중구, 종로구, 용산구, 영등포구를 포함한 62개 열섬취약지역을 도출하였다. 엄정희(2016)는 국내외 선행연구 고찰을 통해 열섬 취약성 평가지표를 선정하고, 서울시 공간정보를 구축하여 퍼지이론을 활용한 GIS공간분석을 통해 평가하였다. 이를 통해 강남지역이 강북지역보다 열 환경에 더 취약하다는 결과를 도출하였다. 서울시 도시계획국(2021)은 도시계획 및 공간관리 추진계획을 수립하여 지표면온도를 통해 열 환경 공간의 유형을 나누고, 30×30m 격자(서울시 약 67만6천 개) 단위로 기후환경 정보를 구축하였다. 이상기후 관리지역에 맞는 녹색 습터, 바람길 조성 등 지구 단위로 계획 및 모니터링을 진행하고 있다. 또한, 제 3차 기후변화 정책(2021)에 따르면, 국가적응대책과 광역·기초지자체의 적응대책 세부 시행계획 간 연계성과 법적 기반이 부재한 것이 현실로 지적된다.

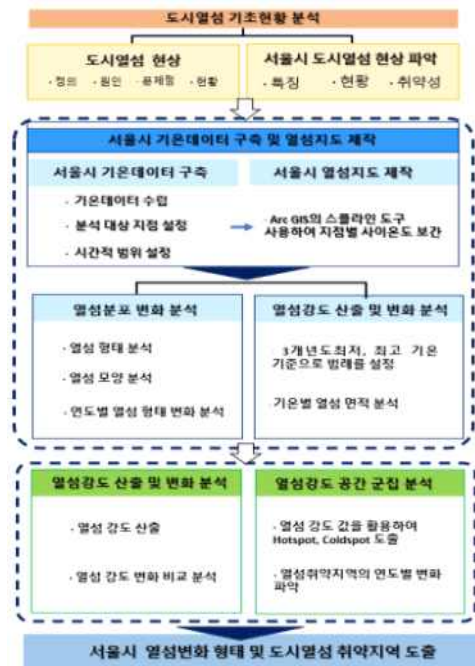
선행연구 분석 결과, 열섬 강도 값 산출 및 GIS 공간분석을 통해 행정구역별 열섬취약지역을 도출하는 연구가 많이 진행된 것을 알 수 있다. 도시열섬에 대한 국내 대부분의 연구는 주로 위성영상, 자동기상측정망(AWS)으로부터 특정 시간대 자료를 활용하여 열섬 특성 분석에 초점을 맞추고 있으나, 장기간에 걸쳐 일정 시간 단위로 정량적인 서울시 열섬 변화를 분석한 연구는 전무하다. 또한, 열섬 강도의 명확한 정의 및 연도별 변화를 분석하고, 행정동별 열섬 지역을 도출해낸 연구가 부족한 현실이다. 이에 이 연구는 서울시 기상자료개방포털의 데이터를 활용하여 열섬지도를 제작함으로써, 열섬 강도 산정 및 열섬 취약지역 도출을 중심으로 분석한다는 점에서 차별성과 의의를 가진다.

### III. 분석의 틀과 열섬지도제작

#### 1. 분석의 틀

이 연구를 위한 분석은 크게 이론검토, 열섬 지도 제작, 열섬 취약지역 도출의 3개 단계로 구하였으며, 이를 정리하면 <그림 5>와 같다. 첫 번째 단계는 도시열섬관련 이론 고찰과 선행연구 검토를 진행하여 연구 방향을 수립한다. 두 번째 단계에서는 최근 15개년도 중 3개년을 선정하여 43개 지점의 AWS 온도 데이터를 ArcGIS 내 Spline 공간보간법을 적용하여 0.1℃ 간격 등온선 열섬지도를 제작하고, 각 연도별 열섬 분포 특성 및 그 변화를

<그림 5> 분석의 틀



4) 핫스팟분석은 높은 값을 가진 지점들로 둘러싸인 높은 값을 가진 지점이다(김대영, 2014).



분석한다. 마지막으로 서울시 내외(25 vs. 18)지점의 온도 차를 활용하여 열섬 강도를 산출하고, ArcGIS내 공간적 자기상관 지표인 Getis-Ord Gi 값을 활용하여 열섬 강도 값이 높은 지역인 핫스팟 지역을 규명하였다. 이 연구에서 규정하는 열섬취약지역은 상대적으로 열 환경 피해가 발생할 가능성이 집중분포 된 지역을 의미하며, 이는 3개 연도 공간 군집분석 결과에 근거하여 핫스팟지역이 연중 1회 이상 발현한 곳을 대상으로 하였다. 이를 활용하여, 취약성이 높은 3개년 중복 열섬취약지역을 발굴한다.

## 2. 서울시의 기상데이터 현황과 분석대상 3개년 기온자료 구축

기상청은 전국 약 510여 지점에 각종 실시간 기상정보를 자동기상관측장비(AWS)를 설치하여 자동으로 관측하는 등 다양한 기상정보를 수집하여 실시간으로 제공하고 있는 '기상자료개방포털(data.kma.go.kr)'을 운영하고 있다. AWS는 관측 공백 해소 및 국지적인 기상 현상을 파악하는 데 용이하며, 산악지역 및 도서 지역 등 사람이 관측하기 어려운 곳에 설치되어 국지적 위험 기상현상

을 실시간으로 감시하는, 더 정확한 기상정보를 체계화할 수 있다. 기상자료개방포털의 자료에 따르면, 2000~2020년 기간 중 2019년은 최근 5년 내 평균 최고 기온이 가장 높았으며, 2012년은 2015년 이전 기간에서 폭염 일수 및 최고 기온이 가장 높았던 것으로 확인되었다. 또한, 2005년도 는 평균기온 및 평균 최고 기온이 높은 해로 2000년~2020년 중 동일 주기로 집중분석 연도를 선정하였다(그림 6). 서울시 기상청에서 운영하는 자동기상관측장비(AWS) 자료 구축은 1997년부터 1분단위로 실시간 확인이 가능하며, 이 연구에서는 서울, 경기, 인천지역 총 43개 지점의 최근 15년 중 3개 연도 데이터를 30분 단위로 선별하여 연평균 기온을 소수점 둘째 자리까지 산출하였다(표 1).

연평균 비교 결과, 2005년도 12.26℃에서 2019년도 13.64℃로 1.38℃가 상승하였다. 2005년 3월~2006년 2월의 연평균 기온분포를 보면, 최고 기온은 영등포(13.57℃), 최저기온은 관악산(11.31℃)으로 나타났다. 2012년 3월~2013년 2월의 연평균 기온분포를 보면, 최고기온은 중랑(13.77℃), 최저기온은 관악산(10.98℃)으로 나타났다. 2019년 3월~2020년 2월의 연평균 기온분포의 경우 최고 기온은 송파(15.1℃), 최저기온은 은평(12.49℃)으로 나타났다.

〈그림 6〉 서울시 2000~2020년 기후변화

출처: 기상자료개방포털(2020)



〈표 1〉 3개년 지점별 연평균 AWS 데이터

지점	°C '05.03 ~ '06.02	'12.03 ~ '13.02	'19.03 ~ '20.02	지점	°C '05.03 ~ '06.02	'12.03 ~ '13.02	'19.03 ~ '20.02
관악(레)	8.49	8.76	10.34	구로	12.35	11.69	14.31
강남	13.21	13.03	14.48	강북	13.31	12.46	14.47
서초	13.50	13.01	14.48	관악	11.31	11.08	12.83
강동	12.33	12.00	14.18	영등포	13.57	13.01	15.07
송파	13.46	13.05	15.10	포천	12.57	10.30	12.41
강서	12.60	12.15	14.20	금촌	11.18	11.43	12.89
양천	13.51	12.96	15.01	공촌동	12.33	11.41	13.39
도봉	12.15	11.43	13.35	익정부	11.58	10.90	12.91
노원	12.09	11.34	12.84	고양	11.63	10.85	13.18
동대문	13.49	12.46	14.75	남양주	10.74	11.31	13.36
중랑	13.17	13.77	14.79	청평	11.03	10.31	12.21
가상청	12.98	12.79	14.16	광주	11.51	10.71	12.71
마포	13.33	12.07	14.53	시흥	12.66	12.31	13.67
서대문	11.75	11.78	13.84	구리	12.19	11.93	13.84
광진	13.38	12.98	14.39	금곡	11.46	10.96	13.12
성북	12.29	11.84	13.55	성남	13.08	12.18	13.65
용산	13.36	12.81	14.69	능곡	11.84	11.20	12.71
은평	12.48	10.98	12.49	과천	12.50	11.87	13.40
금천	13.31	12.58	15.00	양주	11.36	10.38	12.04
한강	13.23	13.07	14.85	광릉	9.61	9.93	11.82
중구	11.44	11.04	13.35	부평	10.74	11.99	13.13
성동	13.13	12.82	15.08				

\*참고: 기상자료개방포털 일 단위 자료로 평균기온 작성

### 3. 열섬 지도 제작과 변화 분석

#### 1) 열섬 지도 제작

2005년 3월~2006년 2월, 2012년 3월~2013년 2월, 2019년 3월~2020년 2월을 대상으로 연평균 열섬 지도를 제작한 방법은 다음과 같이 진행하였다. 첫째, 앞서 구축한 43개 지점의 3개년 연평균 데이터를 이용해 ArcGIS내 Spline 도구의 RBF 보간법을 통해 서울시 주변까지 기온이 보간

된 열섬 도면을 제작하였다. 둘째, 이 도면을 GIS Contour 툴을 적용하여 0.1°C 간격 등온선을 작성하고, 이를 서울시 경계를 중심으로 중첩 표시하여 열섬 지도를 완성하였다(〈표 2〉 참조). 이 경우 열섬 내 기온별 면적변화 분석을 위해 ArcGIS 내 Feature to polygon을 사용하여 도식화하였다.

#### 2) 열섬 분포변화 분석

이 연구에서는 앞서 제작한 3개 연도 열섬 지도를 기준으로 열섬 분포변화를 다음과 같이 분석하였다. 서울시 내 폐곡선을 이루는 등온선 중 크기가 최대인 것을 '최대 열섬 폐곡선'이라 하며, 이 폐곡선 내 최고 기온으로 나타난 폐곡선을 '고온 핵'이라 정의하였다.

2005년도 연평균 열섬 분포를 보면, 고온 핵이 13.4°C로 양천, 영등포, 서초 총 3곳에서 나타났다. 최대 열섬 폐곡선은 13°C로 서울시 면적의 31%를 차지하였다. 서 측에서는 양천, 영등포, 한강, 마포, 금천, 용산지점을 포함하고 있으며, 동 측에서는 동대문, 중랑, 성동, 강남, 광진, 송파, 서초를 포함하여 나타났다.

2012년도 연평균 열섬 분포를 보면, 고온 핵이 13.6°C로 중랑지점 1곳에서 나타났다. 2005년도 대비 고온 핵의 개수가 감소하였지만, 온도는 증가하였다. 2012년도부터는 최대 열섬 폐곡선이 동서로 양분되어 나타났다. 이는 동~서의 기온 차가 벌어지기 시작했으며, 열섬이 집중된 것으로 판단된다. 최대 열섬 폐곡선은 동 측은 13.2°C, 서 측은 12.7°C로 나타났다. 서 측에서는 기상청, 양천, 영등포, 한강, 용산지점을 포함하고 있었으며, 동 측에서는 중랑지점을 포함하여 나타났다. 2005년도와 비교해 보았을 때, 고온 핵의 온도 외에는 그 수



〈표 2〉 연평균 온도를 활용한 3개 연도 열섬 지도 작성

구분		2005년 3월~2006년 2월	2012년 3월~2013년 2월		2019년 3월~2020년 2월	
열섬 지도	<div><div>8.48</div><div>8.48 ~ 8.5</div><div>8.5 ~ 9</div><div>9 ~ 9.5</div><div>9.5 ~ 10</div><div>10 ~ 10.5</div><div>10.5 ~ 11</div><div>11 ~ 11.5</div><div>11.5 ~ 12</div><div>12 ~ 12.5</div><div>12.5 ~ 13</div><div>13 ~ 13.5</div><div>13.5 ~ 14</div><div>14 ~ 14.5</div><div>14.5 ~ 15</div><div>15 ~ 15.5</div></div>					
	<div><div>최대고기 열섬 폐곡선</div><div>최고기온 열섬 폐곡선</div></div>					
최대 열섬 폐곡선 온도(℃)		13	동측	13.2	동측	14.5
			서측	12.7	서측	14.7
고온핵 온도(℃)		13.4	13.6		15	
고온핵 개수		3	1		4	
평균 / 최저 / 최고 온도(℃)		12.26 / 9.00 / 13.40	11.78 / 9.00 / 13.6		13.64 / 10.80 / 15.00	

치가 모두 감소하였음을 알 수 있다. 가장 큰 변화는 중랑지점의 열섬 현상이 확연하게 나타난 점과 서 측 열섬 폐곡선 모형에서 금천지점이 제외되고, 용산지점이 포함되어, 가로로 긴 형태로 생성되었다는 점이다.

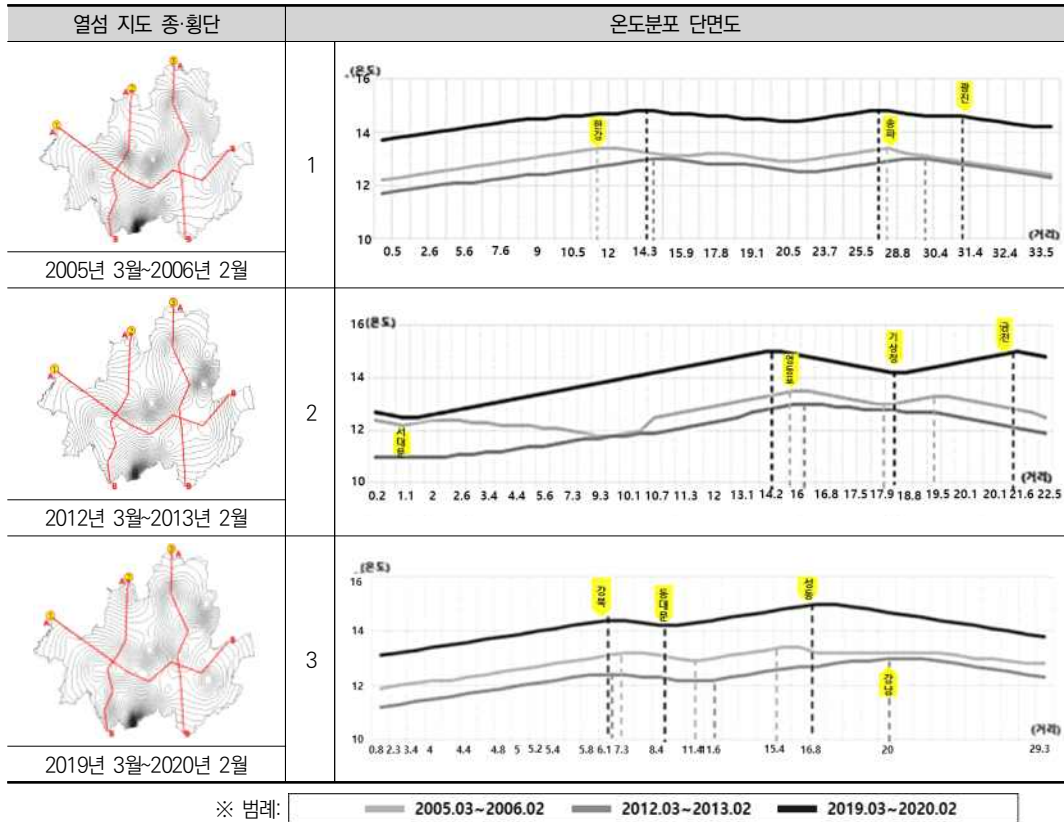
2019년도 연평균 열섬 분포를 살펴보면, 고온핵이 15℃로 양천~영등포, 금천, 성동, 송파지점 총 5곳에서 나타난다. 2005년도, 2012년도 대비 온도 및 개수가 증가하였다. 최대 열섬 폐곡선이 동서로 양분되어 나타났으며, 서 측에서는 14.7℃, 동 측에서는 14.5℃로 나타났다. 서 측에서는 양천, 영등포, 한강, 금천 지점을 포함하고 있고, 동 측에서는 서초, 송파, 성동, 동대문, 중랑지점을 포함하여 나타났다.

서울시 3개 연도 열섬효과 전체 변화로 보았을 때, 서 측의 변화는 시간 흐름에 따라, 양천, 영등

포, 한강지점을 중심으로 서 측으로 치우치며 나타나고, 최대 열섬 폐곡선의 기온이 1.5℃ 상승했음을 확인했다. 동 측의 변화는 2012년도에 중랑지점에 열섬이 집중적으로 나타난 것 외에는 모두 동일한 지점들이 포함되며, 열섬 폐곡선의 기온이 1.4℃ 상승하였고, 범위가 더 확대되었음을 확인했다. 또한, 송파의 열섬 폐곡선 기온 및 범위가 점점 커지는 것에 주목할 필요가 있다. 〈표 2〉에서 보이는 바와 같이, 서울시 평균기온은 지속 상승하고 지역 특성에 따라 온도분포에 차이를 보이며, 폐곡선 내 고온 핵의 개수 및 기온은 높아지고, 동~서의 기온 차가 커져 더욱 양분된 형태로 열섬 형태가 나타나게 될 것이다.

그다음은 열섬 분포를 비교하고자, 연도별 열섬 지도의 횡단(한강 1개), 종단(동~서 총 2개)으로 온도분포 단면도를 제작하여 분석하였다. ‘지점 1’은

〈표 3〉 연평균 열섬 지도 3개 지점 단면도



한강지점을 지나며, 한강 등온선의 변화를 보고자 지정하였다. ‘지점 2’는 은평, 서대문, 마포, 영등포, 기상청, 금천지점을 지나며, 서 측 등온선의 변화를 보고자 지정하였다. ‘지점 3’은 도봉, 강북, 동대문, 성동, 강남지점을 지나며, 동 측 등온선의 변화를 보고자 지정하였다(〈표 3〉 참조).

‘지점 1’의 단면도 분석 결과는 다음과 같다. 연도별 기온편차는 12.2~13.4℃(2005년도), 11.7~13℃(2012년도), 13.7~14.8℃(2019년도)로 나타난다. A부터 한강지점까지 3개 연도 모두 증가세를 보이며, 2005년도에는 12~13.6km 지점에서 13.4℃, 2012년도에는 14.2~15km 지점에서 13℃, 2019년도에는 11.5~15.2km 지점에서 14.8℃로

나타났다. 이는 마포, 영등포, 한강지점의 영향으로 온도가 상승한 것으로 보인다. 또한, 2005년도 단면에서 볼 수 있었던 15.8~18km 지점의 온도 감소 부분이 2012년도 이후에는 나타나지 않았다. 이 위치는 한강과 용산지점의 사이로, 독립적인 용산지점 열섬이 영등포~한강지점 열섬 범위가 넓어지며 하나의 큰 열섬이 된 것이다. 이후 송파지점까지 3개 연도 모두 증가세를 보이며, 2019년도에는 강남~광진 사이 지점의 고온 영향을 받으며 열섬이 형성되었다.

‘지점 2’의 단면도 분석 결과는 다음과 같다. 각 연도별 기온편차는 11.8~13.5℃(2005년도), 11~13℃(2012년도), 12.5~15℃(2019년도)로 나타난다.

A부터 영등포지점까지 3개 연도 모두 증가세를 보이나 2005년도에는 서대문지점까지 감소세를 보이고, 2012년, 2019년도에는 은평지점까지만 감소세가 나타난다. A부터 영등포지점까지 보았을 때, 2005년도에는 13.7~15.6km 지점에서 13.5℃, 2012년도에는 15~16.2km 지점에서 13℃, 2019년도에는 14.2~16km 지점에서 15℃로 확인된다. 이후, 2012년도를 제외한 전체연도의 기상청 지점에서 온도가 감소했고, 금천지점에서 높은 온도를 보였다. 2005년도에는 금천과 영등포지점의 온도 차가 0.3℃로 나타났지만, 2019년도에는 차이가 없었다.

‘지점 3’의 단면도 분석 결과는 다음과 같다. 각 연도별 기온편차는 11.9~13.4℃(2005년도), 11.2~13℃(2012년도), 13.1~15℃(2019년도)으로 나타난다. A부터 강북지점까지 3개 연도 모두 증가세를 보이며, 2005년도에는 6~7km 지점에서 13.2℃, 2012년도에는 6.1~7.4km 지점에서 12.4℃, 2019년도에는 6.5~7.3km 지점에서 14.4℃로 나타난다. 이후, 강북과 동대문지점 사이에서 감소세를 보이고 3개 연도 각각 다른 지점에서 강북지점보다 높은 최고 기온이 나타난다. 2005년도에는 13.2~14.1km에서 13.4℃로 동대문지점 근처에서 나타나고, 2012년도에는 20.5~22km에 13℃로 강남지점 근처에서 나타나며, 2019년도에는 17.3~18.4km에서 15℃로 성동지점근처에 나타난다. 이를 볼 때, 2005년도에 비해 2012년, 2019년도에는 열섬 지역이 남쪽 지점으로 이동함을 알 수 있다.

### 3) 열섬 면적변화 분석

앞서 분석한 0.1℃ 간격 등온선 지도를 바탕으로 좀 더 확연한 정량적인 차이를 보기 위해 0.2℃ 간격으로 온도선별 면적을 분석하였다. 2005년

3월~2006년 2월의 온도분포를 보면, 최저기온인 9℃는 0.04%였으며, 최고 기온인 13.4℃는 2.5%를 차지하였다. 가장 높은 비율을 차지한 온도는 12.8℃로 20.4%, 12.4℃는 17.12% 순으로 나타났다. 2012년 3월~2013년 2월의 온도분포를 보면, 최저기온인 9℃는 0.02%로 나타났고 최고 기온인 13.6℃는 0.3%를 차지하였다. 가장 높은 비율을 보이는 온도는 12℃로 13.78%, 12.8℃는 13.43% 순으로 나타났다. 2019년 3월~2020년 2월의 온도분포를 보면, 최저기온인 10.8℃는 0.01%였고, 최고 기온인 15℃는 0.86%를 차지하였다. 가장 높은 비율을 보이는 온도는 14.2℃가 15.36%, 14.4℃가 15.34% 순으로 나타났다. 3개 연도의 온도 범위를 보면 2005년도에는 편차가 4.4℃, 2012년도에는 4.6℃, 2019년도에 4.2℃로 점차 감소하였다(〈표 4〉, 〈그림 7〉 참조).

〈표 4〉 기온별 열섬 면적 비교

구분	2005년 3월~ 2006년 2월		2012년 3월~ 2013년 2월		2019년 3월~ 2020년 2월	
	온도(℃)	비율(%)	면적	비율	면적	비율
9	0.04	0.212	0.02	0.143	-	-
9.2	0.05	0.329	0.05	0.291	-	-
9.4	0.05	0.288	0.06	0.334	-	-
9.6	0.05	0.294	0.05	0.330	-	-
9.8	0.05	0.331	0.09	0.546	-	-
10	0.06	0.356	0.31	1.861	-	-
10.2	0.06	0.355	0.37	2.227	-	-
10.4	0.07	0.394	0.47	2.828	-	-
10.6	0.06	0.389	0.77	4.659	-	-
10.8	0.09	0.552	1.05	6.341	0.01	0.066
11	0.09	0.549	3.29	19.901	0.03	0.191
11.2	0.12	0.743	6.11	36.959	0.04	0.235
11.4	0.15	0.896	4.80	29.043	0.04	0.267
11.6	1.22	7.399	5.61	33.967	0.04	0.258
11.8	5.71	34.584	13.35	80.800	0.05	0.323
12	2.68	16.202	13.78*	83.382	0.06	0.367

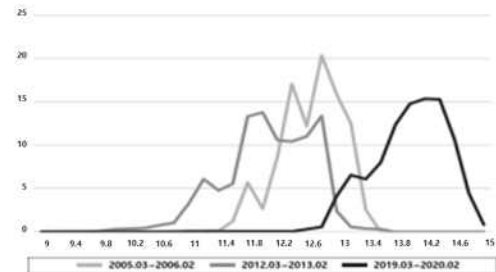
구분	2005년 3월~ 2006년 2월		2012년 3월~ 2013년 2월		2019년 3월~ 2020년 2월	
온도(℃)	비율(%)	면적	비율	면적	비율	면적
12.2	8.71	52.717	10.55	63.830	0.06	0.370
12.4	17.12**	103.648	10.46	63.294	0.07	0.417
12.6	12.21	73.896	11.02	66.671	0.29	1.784
12.8	20.40*	123.448	13.43**	81.305	0.60	3.655
13	15.88	96.094	2.44	14.762	4.13	24.975
13.2	12.56	76.032	0.56	3.402	6.59	39.867
13.4	2.56	15.518	0.39	2.354	6.10	36.933
13.6	-	-	0.30	1.790	8.01	48.496
13.8	-	-	-	-	12.45	75.377
14	-	-	-	-	14.77	89.410
14.2	-	-	-	-	15.36*	92.987
14.4	-	-	-	-	15.34**	92.834
14.6	-	-	-	-	10.64	64.400
14.8	-	-	-	-	4.44	26.852
15	-	-	-	-	0.86	5.176
표준편차	4.4		4.6		4.2	

\*1순위 \*\*2순위

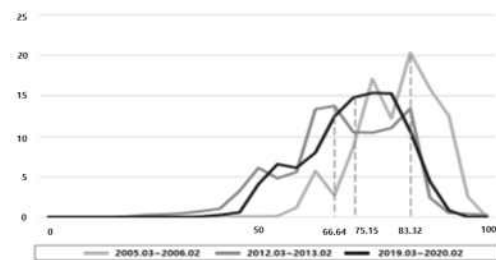
연도별 열섬 면적분포를 비교하고자 3개년의 그래프를 동일한 범례의 분포 표를 다음과 같이 제작하였다(〈그림 7〉, 〈그림 8〉 참조). 연도별 비율의 평균값은 2005년 3월~2006년 2월이 83.32%, 2012년 3월~2013년 2월이 66.64%, 2019년 3월~2020년 2월이 79.15%로 나타났다. 또한, 각 연도별 비율 상위 10%를 차지하는 분포는 2005년도와 2019년도에서는 동일하게 91.66%, 2012년도는 83.32%로 나타났다. 그다음 연도별 비율 상위 5%를 차지하는 분포는 2005년도는 10%와 동일하게 91.66%로 나타났고, 2012년도에는 93.32%로 나타났으며, 2019년도에는 95.83%로 나타났다. 3개 연도의 변화를 보았을 때, 평균값의 분포가 나타나는 곳은 4.17% 감소하였지만, 상위 5%, 10%의 분포가 상승하여, 고온 분포가 집중된 것을 확인하였다. 또한, 표준편차는 2019년도가 4.2℃

로 가장 작게 나타나며, 최저·최고 온도 차가 줄어든 것으로 열섬 현상이 심화되었다고 판단할 수 있다.

〈그림 7〉 3개 연도 기온별 열섬 면적(m²) 분포도



〈그림 8〉 3개 연도 기온별 열섬면적분포비율(%) 분포도



## IV. 서울시 열섬 강도 변화분석과 공간군집분석

### 1. 서울시 열섬 강도 분석

이 연구에서는 3개 연도 연평균 기온데이터를 활용하여, 서울시의 열섬 강도를 선정하고자 하였다. 이 연구에서의 열섬 강도는 서울시 내 지점들과 주변 지역 지점들의 평균기온 값 차이로 정의하

였다<식 1>. 또한, 지점별 열섬 강도 산출을 위해서 교외 18개 지점(인천 3개, 경기 15개)의 기온 평균값과 서울시 내 각각 지점별 기온과의 차이를 열섬 강도로 정의하였다<식 2>.

$$\langle \text{식 1} \rangle \Delta T_{u-r} = T_u(a) - T_r(a)$$

$T_u(\text{average})$  = 서울지점 기온 평균

$T_r(\text{average})$  = 교외지점 기온 평균

$$\langle \text{식 2} \rangle \Delta T_{u-r} = T_u - T_r(a)$$

$T_u$  = 서울지점 기온

$T_r(\text{average})$  = 교외지점 기온 평균

그 결과, 교외 및 서울지점 모두 기온 평균값이 증가하였으며, 2005년도에서 2012년도보다 2012년도에서 2019년도 증가 폭이 더 컸다. 교외지점들은 15년간 1.31℃ 증가하였고, 서울지점은 1.42℃ 증가하였다. 서울시 열섬 강도 산정 결과, 2005년도는 1.015℃, 2012년도는 1.016℃, 2019년도는 1.115℃로 나타났다. 이를 통해 도시열섬 강도가 증가하고 있음을 정량적으로 파악하고, 서울에서 기온이 주변 교외 지역에 비해 높게 나타나는 열섬현상이 연도별로 증가하고 있음을 확인하였다(<표 5> 참조).

〈표 5〉 연도별 서울시 열섬 강도

단위(℃)	2005년 03월 ~2006년 02월	2012년 03월 ~2013년 02월	2019년 03월 ~2020년 02월
Tu(a)	12.662	12.191	14.082
Tr(a)	11.648	11.175	12.967
열섬강도*	1.015	1.016	1.115

\*  $\Delta T_{u-r} = T_u(\text{average}) - T_r(\text{average})$

〈식 2〉에서 산출한 지점별 열섬 강도에서 3년도 평균 열섬 강도는 중랑<영등포>송파>양천 순으로 높게 나타났으며, 관악<중구>노원 순으로 낮게 나타났다. 2005년도의 열섬 강도는 영등포가 2.098℃로 가장 높았으며, 관악(-0.162℃)이 가장 낮게 나타났다<표 7>. 2012년도의 열섬 강도는 중랑(2.729℃)이 가장 높았으며, 은평(-0.061℃)이 가장 낮게 나타났다. 2005년도를 대상으로 열섬 강도 변화율을 비교한 결과, 열섬 강도 변화율은 은평이 -1.069℃ 감소로 가장 컸으며, 강서, 성북지점이 -0.019℃ 감소로 가장 적게 나타났다. 2005년도의 최고 강도 지점인 영등포는 -0.129℃ 감소하였으며, 최저 강도 지점인 관악지점은 0.039℃ 증가하였다. 2019년도의 열섬 강도는 송파(2.279℃)가 가장 높았으며, 은평지점이 -0.331℃로 가장 낮게 나타났다. 2012년도를 대상으로 열섬 강도 변화율을 비교한 결과, 구로가 0.84℃ 증

〈표 6〉 연도별 열섬강도지도

구분	2005년 3월~2006년2월	2012년 3월~2013년 2월	2019년 3월~2020년 2월	비고
열섬 강도지도				
평균열섬강도(℃)	1.357	1.287	1.410	
최고열섬강도(℃)	2.098 (영등포)	2.729 (중랑)	2.279(송파)	
최저열섬강도(℃)	-0.162 (관악)	-0.061(은평)	-0.331(은평)	

가로 가장 컸으며, 한강지점이 0.001℃ 증가, 관악 지점이 -0.03℃ 감소로 변화율이 가장 낮았다. 2012년도의 최고 강도 지점인 중랑은 -0.76℃로 열섬 강도가 감소하였고, 최저 강도 지점인 은평은 -0.27℃ 감소로 열섬 강도가 더욱 낮아진 것을 확인하였다(〈표 6〉, 〈표 7〉 참조).

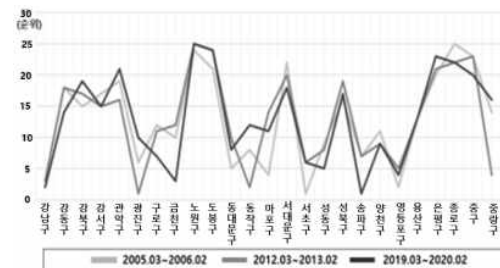
〈표 7〉 연도별 열섬 강도 변화

지점	2005년~2012년			2012년~2019년		[A+B+C]/3
	A*	B**	[B-A]	C***	[C-B]	
강남	1.738	1.989	0.251	1.659	-0.33	1.795
서초	2.028	1.969	-0.059	1.659	-0.31	1.885
강동	0.858	0.959	0.101	1.359	0.4	1.059
송파	1.988	2.009	0.021	2.279	0.27	2.092
강서	1.128	1.109	-0.019	1.379	0.27	1.205
양천	2.038	1.919	-0.119	2.189	0.27	2.049
도봉	0.678	0.389	-0.289	0.529	0.14	0.532
노원	0.618	0.299	-0.319	0.019	-0.28	0.312
동대문	2.018	1.419	-0.599	1.929	0.51	1.789
중랑	1.698	2.729	1.031	1.969	-0.76	2.132
가상청	1.508	1.749	0.241	1.339	-0.41	1.532
마포	1.858	1.029	-0.829	1.709	0.68	1.532
서대문	0.278	0.739	0.461	1.019	0.28	0.679
광진	1.908	1.939	0.031	1.569	-0.37	1.805
성북	0.818	0.799	-0.019	0.729	-0.07	0.782
용산	1.888	1.769	-0.119	1.869	0.1	1.842
은평	1.008	-0.061	-1.069	-0.331	-0.27	0.205
금천	1.838	1.539	-0.299	2.179	0.64	1.852
한강	1.758	2.029	0.271	2.029	0.001	1.939
중구	-0.032	-0.001	0.031	0.529	0.53	0.165
성동	1.658	1.779	0.121	2.259	0.48	1.899
구로	0.878	0.649	-0.229	1.489	0.84	1.005
강북	1.838	1.419	-0.419	1.649	0.23	1.635
관악	-0.162	0.039	0.201	0.009	-0.03	-0.038
영등포	2.098	1.969	-0.129	2.249	0.28	2.105

\*'05.03~'06.02열섬강도 \*\*'12.03~'13.02열섬강도 \*\*\*'19.03~'20.02 열섬강도

지점별 열섬 강도 값을 활용하여 서울시 25개 구 단위로 열섬 강도 순위를 다음과 같이 산출하였다(〈그림 9〉 참조). 2005년도에는 서초구(1순위), 영등포구(2순위), 강남구(3순위)로 나타났으며, 2012년도에는 광진구(1순위), 동작구(2순위), 강남구(3순위), 2019년도에는 송파구(1순위), 강남구(2순위), 금천구(3순위)로 순으로 나타났으며, 상위권 내에 동부지역의 비율이 비교적 높게 나타났다. 또한, 2005년도와 2019년도만 비교했을 때, 순위가 가장 많이 상승한 구는 금천구(+7위), 송파구(+6위)로 나타났다.

〈그림 9〉 구 단위 열섬 강도 순위



## 2. 서울시 열섬 강도 군집분석

서울시의 핫스팟을 확인하는 것은 3개 연도 간 도시열섬 현상의 군집도를 파악하여 열섬 현상 변화를 파악하기 위해 필요한 단계이다. 산출된 서울시 열섬 강도 값을 활용한 공간적 군집분석<sup>5)</sup>(Getis-Ord Gi) 방법은 다음과 같다. 첫째, 서울시 열섬 강도 값 산출 후, 열섬지도제작과 동일하게 열섬 강도 지도를 제작하였다(〈표 6〉 참조). 둘째, ArcGIS 내 Raster to point를 활용하여 보간된 서울시 열

5) 공간적 군집분석(Getis-Ord Gi)은 일정한 범위 내 인접 지역들과의 개별적 군집경향을 검증하는 방법이다.

섬 강도 수치를 point화 하였다. 셋째, Spatial Join툴을 활용하여 서울시 행정동 지도와 중첩 결합하였다. 마지막으로, Getis-Ord Gi분석을 활용하여 열섬 강도 값이 추가된 서울시 행정동 지도를 분석하였다. 이에 따라 Getis-Ord Gi분석의 공간적 단위는 행정동을 기준으로 한다.

도시열섬에 중점을 둔 이 연구에서는 서울시 열섬 강도의 공간적 종속성을 확인하고 군집된 열섬 지역을 도출하기 위해 열섬 강도의 공간적자기상관 지수인 Getis-Ord Gi<sup>\*</sup>값을 활용하여 Hotspot 분석을 실시하였다. <표 8>에서 확인 할 수 있는 Getis-Ord Gi는 z-score 절댓값이 2.58이상일 때 99% 신뢰구간에서 유의미했으며, 절댓값이 2.58~1.96일 때는 95% 신뢰구간에서, 절댓값이 1.96~1.67일 때는 90% 신뢰구간에서 각각 유의미했다. 즉, Z-score가 높은 지역이 높은 신뢰도

의 핫스팟으로 나타났다. 퍼센트(%)별 신뢰도가 높을수록 열섬 강도값이 높으며, 이는 열섬취약성이 높다고 해석할 수 있다.

2005년도에 138개 동에서 면적 203.07km<sup>2</sup>로 나타난 핫스팟지역이 2019년도에는 90개 동에서 면적이 132.27Km<sup>2</sup>으로 감소하였다. 99% 취약성 지역을 보면 2005년도는 41.22Km<sup>2</sup> 면적에서 2.147℃ 열섬 강도 평균값을 가지는 것으로 나타났다. 2012년도는 54.90Km<sup>2</sup> 면적에서 2.222℃의 열섬 강도 평균값이 나타난다. 2019년도는 35.58Km<sup>2</sup>에서 2.753℃의 열섬 강도 평균값이 나타났다. 3개 연도의 99% 취약성 핫스팟을 비교해 보면 면적은 점점 감소하지만 열섬 강도 평균값이 2.147℃에서 2.753℃로 증가하며, 더 확연한 차이가 보여진다. 이는 고온이 좁은 면적으로 집중되었음을 보여준다. 또한, 서 측의 열섬 취약지역을 보

<표 8> 3개 연도 공간군집분석(Getis-Ord Gi) 결과

구분		2005년 3월~2006년 2월	2012년 3월~2013년 2월	2019년 3월~2020년 2월
열섬강도값 군집 분석 지도 + <표 2> 등온선 열섬지도	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #0056b3; margin-right: 5px;"></div> <span>Cold Spot - 99% Confidence</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #0070c0; margin-right: 5px;"></div> <span>Cold Spot - 95% Confidence</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #a6c9ec; margin-right: 5px;"></div> <span>Cold Spot - 90% Confidence</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #ffff00; margin-right: 5px;"></div> <span>Not Significant</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #ff7f0e; margin-right: 5px;"></div> <span>Hot Spot - 90% Confidence</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #ff7f0e; margin-right: 5px;"></div> <span>Hot Spot - 95% Confidence</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #d62728; margin-right: 5px;"></div> <span>Hot Spot - 99% Confidence</span> </div> </div>			
	99%Confience hotspot	행정동(개)/면적(km <sup>2</sup> ) 열섬강도 평균값(℃)	23 / 41.22 2.147	41 / 54.90 2.222
	95%Confience hotspot	행정동(개)/면적(km <sup>2</sup> ) 열섬강도 평균값(℃)	78 / 110.18 1.932	70 / 96.34 1.956
	90%Confience hotspot	행정동(개)/면적(km <sup>2</sup> ) 열섬강도 평균값(℃)	37 / 51.67 1.828	18 / 27.23 1.729
	핫스팟 면적합(Km <sup>2</sup> )	203.07	178.47	132.27

- 6) 각각의 군집 정도를 보여주는 Getis-Ord Gi는 객체의 Z-score를 계산한 값으로, 통계적으로 의미를 부여하기 위해서는 해당 지역의 값이 높을 뿐 아니라, 값이 높은 인접 지역으로 둘러싸여 있어야 한다. 따라서 해당 지역과 인접 지역의 온도가 높은 군집은 핫스팟, 반대로 낮은 군집은 콜드스팟을 의미한다(Lee and Seong, 2016; Getis and Ord, 1992).



면 2005년도에는 한강범위를 넘어서는 핫스팟구간을 나타내지만, 2012년도와 2019년도로 갈수록 남쪽으로 치우쳐 나타났다. 동 측의 열섬취약지역은 2005년도에는 북한산과 불암산 사이로 생성된 핫스팟이 2012년도에는 동 측에 집중되어 나타나다가, 2019년도에는 남동 측으로 확대 집중되어 나타났다.

앞서 <표 8>의 결과 중 3개 연도의 핫스팟 분석 결과와 <표 2>의 열섬 지도 등온선 분석 결과를 연계하여 분석한 결과는 다음과 같다. 2005년도 핫스팟면적 합은 서울시의 33.5%로 열섬 지도의 최대 열섬 폐곡선 비율인 31%와 비슷하였다. 13.4℃로 고온 핵이 나타난 양천, 영등포, 서초지점에서 99% 핫스팟지역이 나타났으며, 13.3℃의 열섬 폐곡선 내에 있는 광진, 송파, 동대문지점에서는 95% 핫스팟지역이 나타났다. 90% 핫스팟은 열섬 폐곡선이 12.8℃인 용산지점에서 나타났다. 2012년도 핫스팟지역은 열섬 지도의 12.6℃ 등온선에서 대부분 나타났다. 13.6℃로 고온 핵이 나타난 중랑지점과 13℃로 열섬 폐곡선이 나타난 강남에서 99% 핫스팟지역이 나타났다. 또한, 13℃로 열섬 폐곡선이 나타난 서초, 송파, 양천~영등포 지점에서 95% 핫스팟지역이 나타났다. 2019년도 핫스팟지역은 열섬 지도와 비교해 보았을 때, 서 측은 거의 동일하게 나타났지만, 동 측에서는 송파와 성동지점을 중심으로 나누어져서 나타났다. 또한, 열섬 지도에서 15℃로 고온 핵이 나타난 송파에서는 99% 핫스팟이 나타났으며, 양천~영등포, 금천, 성동지점에서는 95% 핫스팟지역이 나타났다.

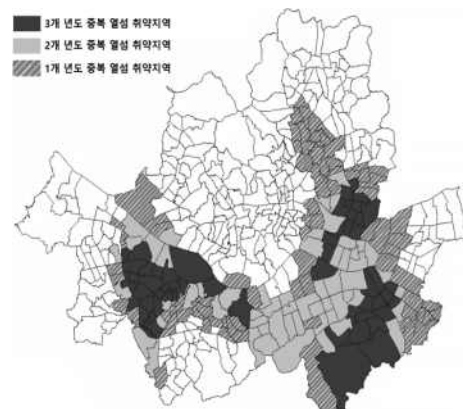
3개 연도 등온선 분석 결과와 핫스팟을 연계한 결과, 시간 흐름에 따라 99% 핫스팟지역의 등온선 기온이 15℃로 1.6℃ 상승하였다. 2005년도 99%

핫스팟지역이었던 양천, 영등포는 2012년도부터 95% 핫스팟지역으로 나타났고, 95% 핫스팟지역이었던 송파는 2019년도에 99% 핫스팟지역으로 나타났다.

### 3. 서울시 열섬 취약지역 도출

앞선 3개 연도 공간군집분석 결과를 종합적으로 분석하여 핫스팟지역 도출 결과의 중복 연도 수에 따라 정리하면 <그림 10>과 같이 도출할 수 있다. 3개 연도 공간 군집분석에서 핫스팟지역은 열섬 강도가 높고, 해당 값을 가진 지점들에 의해 둘러싸인 지점이므로 상대적으로 취약성이 높은 지역이다. 또한, 해당 열섬 강도의 밀집도를 나타내는 신뢰도는 도시 열섬에 대한 취약성을 나타낸다고 볼 수 있다. 이러한 행정동을 열섬 취약지역이라 정의하며, 총 191개의 동으로 나타난다. 3개 연도 중 1개 연도에서 열섬 취약지역으로 발생한 동은 80개, 2개년 도에서 중복으로 열섬 취약지역이 나타난 동은 58개, 3개 연도 모두 열섬 취약지역으로 53개 동이 나타났다.

<그림 10> 3개 연도 종합 열섬취약지역 도출결과



그다음은 <그림 10>의 종합 핫스팟지역에서 3개 연도 중복으로 나타난 지역을 가장 도시 열섬에 취약한 지역으로 볼 수 있으며, 이 지역에 대한 신뢰도에 따라 해당 동을 구분하여 도출한 결과는 <그림 11>과 같다. 3개 연도 모두 핫스팟으로 나타난 53개 동의 열섬 취약지역은 크게 3곳으로 분류된다. 첫째, 서남권 지역은 24개 동으로 목 1, 4, 5동, 신정 2, 6동, 사당 2동, 노량진 1동, 대림 3동, 신길 3, 4동, 도림동, 영등포본동, 영등포동, 신길 1동, 문래동, 당산 1동, 양평 1동, 여의동, 가리봉동, 구로 2, 3, 4, 5동, 신도림동이 있다. 이곳은 준공업지역, 일반상업지역으로 생활인구가 밀집되어있는 특징이 있다. 둘째, 동남권에는 15개 동으로 가락 1동, 삼전동, 송파 1, 2동, 석촌동, 방이 2동, 잠실 3, 6동, 내곡동, 세곡동, 개포1동, 일원 본동, 일원 1, 2동, 수서동이 있으며, 이는 일반 주거지역이 대부분이다. 셋째, 동북권은 14개 동으로 청담동, 면목 4, 5동, 장안 1, 2동, 능동, 군자동, 중곡 1, 2, 3, 4동, 성수2가 1, 2동, 송정동이 있고, 마찬가지로 일반주거지역이다. 동 측 열섬 취약지역의 행정동이 서 측 대비 많이 나타나며, 동 측에서는 강북지역에서 동일하게 나타나는 것

으로 확인하였다. 서남권과 동북권 모두 교통량이 많은 것이 열섬의 주원인으로 판단된다. 성수는 '산업개발진흥지구'에 포함되어있다는 특징이 있다.

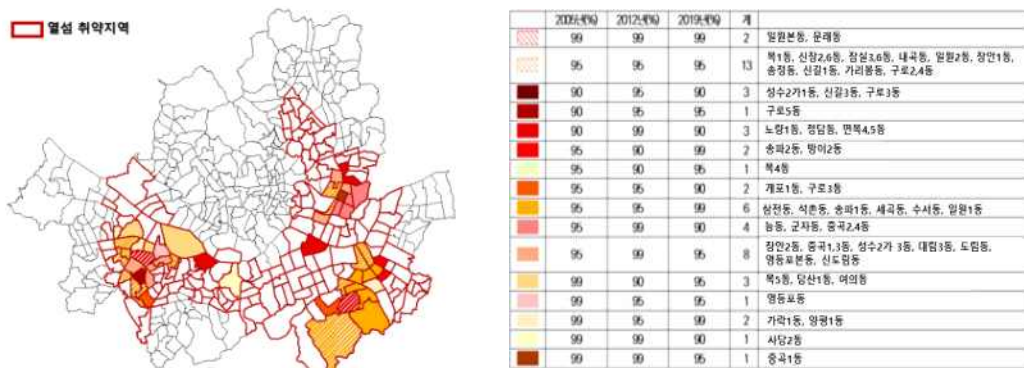
종합한 결과, 핫스팟 지역 중 3개 연도 모두 95% 취약한 곳으로 나타난 지역이 13개의 동으로 가장 많았다. 또한, 3개 연도 모두 99% 취약성으로 나타난 일원본동과 문래동 2곳은 가장 열섬에 취약한 동으로 도출되었다. 이는 동남권, 서남권의 핫스팟 집중지역에서 주로 나타났으며 향후 지속해서 높은 신뢰도의 핫스팟이 나타날 것으로 예상된다.

#### 4. 종합분석 및 시사점

이 연구에서는 3개 연도를 선정하여 수집한 기온 데이터와 산출한 열섬 강도를 통해 열섬 지도를 제작하였다. 이를 활용하여 열섬 분포변화 및 강도변화를 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 열섬 분포 및 면적 변화 부분을 살펴보면, 연평균 비교 결과 2005년도 대비 2019년도에는 1.38℃가 상승하였다. 최대 열섬 폐곡선은 2005년

<그림 11> 열섬 취약지역 도출 및 3개년 중복지역 취약성 분석



도에 13℃로 서울시 대부분을 차지하였지만, 2012년도부터 동-서로 양분되어 나타났으며, 동 측에서 13.2℃, 서 측에서 12.7℃, 2019년도에는 동 측에서 14.5℃, 서 측에서 14.7℃인 것으로 확인됐다. 고온 핵은 2005년도에는 13.4℃로 서초, 양천, 영등포 지점에서 나타났고, 2012년도에는 13.6℃로 중랑에서, 2019년도에는 15℃로 금천, 송파, 성동, 양천, 영등포지점에서 나타났다. 3개 연도 내내 영등포, 송파에서 열섬 폐곡선이 나타났으며, 송파지점의 고온역은 1.6℃ 상승하였다.

둘째, 열섬 분포변화를 보기 위해 3곳의 단면도를 제작하여 비교하였다. '지점 1'의 분석 결과, 한강, 용산, 송파지점에서 고온이 나타나며, 2019년도에는 광진 지점에서 고온이 나타났다. 또한, 2005년도에는 독립적인 용산지점에 고온역이 나타났으나, 2012년도부터 서쪽 열섬의 범위가 커지며, 한강과 용산지점 사이 간격이 줄어들어 하나의 큰 열섬을 생성하였다. '지점 2'의 분석 결과, 2005년도에는 서대문지점까지 온도의 감소세가 나타났으나, 2012년도 이후 은평지점까지만 감소세가 나타났다. '지점 3'의 분석 결과, 3개 연도 모두 강북에서 고온역이 나타났다. 2005년도 동대문지점에서 고온역이 나타난 이후, 2012년도, 2019년도에는 점점 남측에서 나타나는 것을 확인하였다.

열섬 강도 산출 및 공간 군집도 분석 변화를 살펴보면, 서울시 열섬 강도는 2005년도에 1.015℃, 2012년도에 1.016℃, 2019년도에 1.115℃로 나타났다. 서울시 내 기온이 주변 교외 지역에 비해 높게 나타나는 열섬 현상이 연도별로 증가하고 있음을 확인하였다. 2005년도의 지점별 열섬 강도는 영등포(2.098℃) 지점이 가장 높게 나타났으며, 관악(-0.162℃) 지점이 가장 낮게 나타났다. 2012년

도의 열섬 강도는 중랑(2.729℃)지점이 가장 높게 나타났으며, 은평(-0.061℃)지점이 가장 낮게 나타났다. 2019년도의 열섬 강도는 송파(2.279℃)지점이 가장 높았으며, 은평(-0.331℃)지점이 가장 낮게 나타났다. 연평균 열섬 지도와 같이, 영등포, 송파지점에서 높은 열섬 강도를 확인하였으며, 2012년도에는 중랑지점에서 높은 열섬 강도를 볼 수 있었다. 지점별 열섬 강도 값으로 구별 순위를 분석한 결과 서초구(2005년도), 광진구(2012년도), 송파구(2019년도)로 나타났다. 이후 열섬 강도 값으로 공간군집 분석을 진행하였다. 핫스팟지역을 살펴보면, 2005년도에서 2019년도로 갈수록 면적이 203.07km<sup>2</sup>에서 132.27km<sup>2</sup>로 감소하였지만, 99% 취약성의 열섬 강도 평균값을 보면 2.147℃에서 2.753℃로 증가하며 고온역이 집중되고 있음을 확인하였다. 이를 통해, 3개 연도 모두 핫스팟지역인 53개 동은 열섬취약 지역으로 도출하였으며, 지속적으로 99% 취약성지역으로 나타난 일원본동과 문래동이 서울시 내 가장 열섬에 취약한 지역으로 나타났다. 이는 기존 서울시 대상 열섬연구와 비슷하게 중심부와 동남부에서 나타나며, 다른 지역에 비해 평균적으로 상업과 업무시설의 연면적과 불투수면의 비율이 상대적으로 높고, 녹지 및 오픈스페이스의 비율이 적은 곳에 해당한다.

앞선 분석 결과에 따라 다음과 같이 시사점을 제시하고자 한다. 첫째, 서울시의 15년간 기온분포를 대상으로 열섬 현상의 변화를 분석하기 위해 3개 연도를 선정하여 열섬지도를 제작하였다. 분석결과 지역특성에 따라 온도분포가 차이가 있으며, 평균기온 또한 지속 상승했으며, 최고-최저기온 편차는 감소하였다. 둘째, 열섬지도의 기온별 면적을 산출하여 연도별 열섬변화를 파악하였다.

열섬폐곡선 면적이 동~서로 양분되며, 고온역의 온도도 증가하였다. 영등포와 송파에서는 지속적인 고온 핵이 나타났으며, 2012년도에는 중랑지점에서 고온 핵이 나타났다. 셋째, 강도 산출결과 서울시 열섬 강도가 증가하고, 지점별 열섬 강도 산출을 통해, 연도별로 영등포(2005년도), 중랑(2012년도), 송파(2019년도)지점이 최고 강도 지점이었으며, 이는 연평균 기온으로 제작한 등온선 열섬지도에서 폐곡선으로 나타난 지점과 동일하였다. 마지막으로, 열섬 강도 값을 통한 공간군집분석 결과 3개 연도 핫스팟을 파악하였다. 이를 통해 핫스팟 취약성에 따른 열섬취약지역 53개동을 도출하였고, 이는 동남권, 서남권에서 주로 나타나고 있으며, 앞으로 열섬완화 방안이 집중적으로 필요한 지역으로 판단된다.

## V. 결론

이 연구는 최근 심각해지고 있는 기후변화에 따른 열돔현상 등 이상기상 현상이 빈번해짐에 따라 도시지역에 직접적 피해를 유발하는 도시열섬 현상에 주목하여 그 현실을 구체적으로 파악하고자 하였다. 이를 위해 서울시 및 주변의 AWS기온데이터를 활용하여 열섬분포 및 그 변화를 분석하고, 열섬 강도를 산출하여 군집분석을 실시해 열섬취약지역을 도출하였다.

자동기상측정망(AWS)의 총 43곳(서울, 경기, 인천)의 기온데이터를 활용하여 2005년 3월~2006년 2월, 2012년 3월~2013년 2월, 2019년

3월~2020년 2월의 열섬지도를 제작하여 살펴본 열섬분포 변화는 다음과 같다. 지난 15년 중 3개 연도에 대한 분석데이터에 따르면, 최대 열섬폐곡선은 2005년도에는 13℃로 서울시의 31%를 차지하였으며, 2012년도, 2019년도에는 최대 열섬폐곡선이 동~서로 구분되어 나타났다. 고온 핵은 2005년도에는 13.4℃로 서울시의 2.56%를 차지하였고, 2012년도에 13.6℃로 서울시의 0.30%를 차지, 2019년도에는 15℃로 0.86%를 차지하였다. 열섬 강도 산출 및 공간 군집분석 변화결과는 다음과 같다. 서울시 열섬 강도는 1.015℃(2005년도)~1.016℃(2012년도)~1.115℃(2019년도)로 증가하였다. 공간군집분석을 통한 핫스팟지역을 살펴보면, 2005년도에 비해 2019년도에는 70.8km<sup>2</sup>가 감소하였지만, 99% 취약성의 열섬 강도 평균 값은 0.606℃가 증가하였다.

이 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 2005년도의 변화는 전체 평균기온이 지속 상승하며 지역 특성에 따라 열섬분포 차이가 있으며, 고온지역 온도는 상승하며 면적은 줄어 집중화된 것으로 분석되었다. 둘째, 최대 열섬폐곡선이 동~서의 기온차가 커지며 열섬분포가 양분화된 형태로 나타났다. 셋째, 서울시 열섬 강도는 2005년도에서 2019년도까지 0.1℃ 상승하였으며, 3개 연도 지점별 열섬 강도를 산출한 결과, 영등포(2005년도), 중랑(2012년도), 송파(2019년도)지점에서 가장 높게 나타났으며 구 단위의 열섬 강도 값 순위는 서초구(2005년도), 광진구(2012년도), 송파구(2019년도)로 나타났다. 넷째, 열섬 강도 값의 행정동 단위 공간군집분석 결과, 동남권, 서남권을 중심으로 53개의 동이 열섬취약지역으로 나타났으며, 그중 취약성에 따라 분류한 결과 일원본동과

문래동이 가장 취약한 지역으로 도출되었다.

이 연구는 서울시를 대상으로 시간 흐름에 따라 열섬지도를 제작하여 열섬변화를 정량적으로 분석하였다는데 의의가 있다. 또한 도시가 이상기후에 적응을 할 수 있도록 열 환경 측면에서 기초자료를 구축했다는 의의가 있다. 즉, 연도별 열섬분포 변화 및 열섬 강도 값의 공간군집분석을 통해 핫스팟 지역의 중복성 및 신뢰도에 따라 행동동 단위까지의 열섬취약지역을 도출하였다는 점에서 향후 서울시 연도별 열섬 변화예측 및 행정동별 열섬완화 방안에 적용할 수 있는 기초자료로 활용가능하다. 반면 최근 15년간 서울시 열섬변화를 분석하기에 특정 3개 연도를 대상으로 진행한 점은 일반화의 어려움이 있다. 또한, GIS 공간보간법의 한계상 지점간 기온 보간이 이루어지므로, 대상지역 및 데이터 분포에 따른 적절한 보간법 선택에 주의해야 한다. 또한, 데이터의 성격상 토지이용과의 상관관계에 대한 해석을 진행하지 못한 것을 한계라 할 수 있다. 앞으로 이 연구를 기초로 열섬취약지역과 그 외 지역을 대상으로 도시의 공간적 요인 및 지리적 요인과의 영향을 구체적으로 분석하여 열섬완화방안을 도출하고, 시간대, 계절별로 좀 더 세분화된 열섬변화를 연구할 필요가 있다.

## 참고문헌

- 서울특별시, 2021, 「제3차 국가 기후변화 적응대책」, 서울시.
- 서울특별시, 2021, 「기후변화 대응 도시계획 및 공간관리 추진계획」, 서울시 도시계획국.
- 고동원 외 2인, 2019, “근린환경특성과 도시열섬현상과의 상호간 관한 연구”, 「한국도시설계학회」, 20(3): 55~67.
- 고영주 외 1인, 2020, “핫스팟 분석을 이용한 도시열섬취약지 특성 분석- 전주시를 대상으로”, 「한국조경학회지」, 48(5): 67~79.
- 구해정 외 2인, 2007, “서울시 도시열섬 구조의 변화에 관한 연구”, 「기후연구」, 2(2): 67~78.
- 김대영, 2014, “GIS를 이용한 산불발생의 공간적 분석”, 「국토지리학회」, 48(3): 325~336.
- 김유진 외 1인, 2012, “기상조건에 따른 서울의 열섬강도 특성에 관한 연구”, 「국토지리학회」, 46(1): 1~9.
- 김용진 외 1인, 2011, “기후변화에 따른 도시열섬현상 특성 변화와 도시설계적 대안 모색에 관한 기초연구”, 「한국도시설계학회」, 12(3): 5~14.
- 명수정, 2010, 「특집: 도시의 열섬현상: 도시열섬현상의 일반적 특성과 원인」, 도시문제, 45(500): 12~16.
- 부경은 외 1인, 2000, “1999년 서울지역 기온의 시공간 분포특성”, 「Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences」, 36(4): 322~323.
- 신영규 외 9인, 2018, 「국토환경연동제 지원을 위한 정밀공간환경정보지도 작성 기법 연구 -대기분야를 중심으로」, 국립환경과학원.
- 오진우 외 2인, 2019, “운량 및 도시공간특성변화에 따른 열섬현상분석: 서울지역을 중심으로”, 「대한설비공학회」, 2019(06): 634~636.
- 조혜민 외 2인, 2019, 「서울시 도시열섬현상 지역의 물리적 환경과 인구 및 사회경제적 특성 탐색」, 지역연구, 35(4): 61~73.
- 조희선 외 2인, 2014, “도시공간특성이 열섬현상에 미치는

- 영향”, 『환경정책』, 22(2): 27~43.
- 제민희 외 1인, “토지이용 유형별 도시열섬강도 분석”, 『한국콘텐츠학회』, 18(11): 1~12.
- Kim and Baik, 2003, “Spatial and Temporal Characteristics of Urban Heat Islands in Seoul”, 『한국기상학회』, 13(1): 238~241.
- L. Anselin and A. Getis, 1992, “Spatial analysis and geographic information systems”, *The Annals of Regional Science*, 26(1): 19~33.
- S. R. Gaffin, 2008, “Variations in New York city's Urban Heat Island strength over time and space”, *-Archive für Meteorologies, Geophysics und Bioclimatology, Serie A*, 2008(94): 1~11.
- Mills.G, 2008, “Luke Howard and the climates of London”, *Weather*, 63(6): 153~157.
- 榑·原·保·志, 1994, “越谷市に見られるヒートアイランド強度”- 東京都目黒区立第九中学校, 41(9): 512~523.
- <http://www.data.kma.go.kr>(2021, 기상자료개방포털)
- <https://www.who.int>(2021, 세계보건기구)

원 고 접 수 일 : 2021년 8월 12일

1 차 심 사 완 료 일 : 2021년 10월 6일

최 종 원 고 채 택 일 : 2021년 12월 23일