

서울시 도시열섬현상 지역의 물리적 환경과 인구 및 사회경제적 특성 탐색*

조혜민** · 하재현*** · 이수기****

Exploring Physical Environments, Demographic and Socioeconomic Characteristics of Urban Heat Island Effect Areas in Seoul, Korea*

Hyemin Cho**, Jaehyun Ha***, Sugie Lee****

국문요약 도시의 개발과 고밀화는 도시공간의 기온이 주변지역보다 높아지는 도시열섬(Urban Heat Island)현상의 원인이 되고 있으며, 도시열섬현상은 기후변화와 함께 그 강도가 증가하고 있다. 이와 더불어 여름철 도시의 대기온도가 상승할 때 소독이 낮은 계층, 고령인구, 건강에 문제가 있는 사회적 취약계층은 높아진 열환경에 대처할 수 있는 능력이 부족하다. 따라서 본 연구의 목적은 서울시의 열섬지역을 공간통계 기법인 Hotspot 분석을 통해 도출하고, 로지스틱 회귀분석을 활용하여 열섬지역의 물리적 환경과 인구 및 사회경제적 특성을 분석하는 것이다. 서울시 423개 행정동을 대상으로 동별 평균 대기온도를 이용하여 도시열섬 Hotspot 분석을 실행한 결과, 서울시 중구, 종로구, 용산구, 영등포구에서 도시열섬 지역이 집중적으로 분포하는 것을 확인하였다. 로지스틱 회귀분석을 통해 열섬지역의 물리적 환경 특성을 분석한 결과, 주거시설 연면적 비율, 상업시설 연면적 비율, 용적률, 불투수면 비율, 정규화식생지수(NDVI)가 열섬지역에 영향을 미치는 유의한 변수로 나타났다. 또한, 열섬지역의 인구 및 사회·경제적 특성을 고려한 열환경 취약지역을 분석한 결과, 기초생활수급자 비율, 독거노인 비율, 기초생활수급을 받는 독거노인 비율 등이 유의한 변수로 나타났다. 본 연구의 결과는 도시열섬현상에 영향을 미치는 물리적 환경변수를 도출하고 사회적 취약계층의 공간적 분포와 도시열섬지역이 중첩되어 있는 지역을 판별함으로써 향후 취약계층을 고려한 도시 열환경 설계와 정책 개발에 있어 시사점을 제공할 것으로 기대한다.

주제어 도시열섬현상, 도시열환경, 기후변화, 열취약지역, 사회적 취약계층, 공간통계

Abstract: Urban development and densification have led to the Urban Heat Island Effect, in which the temperature of urban space is higher than the surrounding areas, and the intensity is increasing with climate change. In addi-

* 이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 20AUDP-B102406-06)으로 수행되었으며, 2015년 12월 한국 도시행정학회 하반기 학술대회에 발표된 논문을 수정 보완하였음.

** 한양대학교 도시공학과 석사 졸업(hyemincho@hanyang.ac.kr)

*** 한양대학교 도시공학과 박사 수료(jaehyunha@hanyang.ac.kr)

**** 한양대학교 도시공학과 교수(교신저자: sugielee@hanyang.ac.kr)

tion, when the city's air temperature rises in summer, low-income, elderly population, and socially vulnerable people who have health problems lack the ability to cope with the elevated heat environment. Therefore, this study aimed to identify the urban heat island area of Seoul through Hotspot analysis, which is a spatial statistics technique, and explored physical environments, demographic and socioeconomic characteristics of urban heat island effect areas using logistic regression models. This study performed urban heat island hotspot analysis using the average air temperatures of the 423 administrative dong in Seoul. Analysis results identified that the urban heat islands were concentrated in Jung-gu, Jongno-gu, Yongsan-gu, and Yeongdeungpo-gu. Logistic regression analysis results indicated that urban heat island areas of Seoul were affected by residential floor area ratio, commercial facility floor area ratio, overall floor area ratio, impervious surface ratio, and normalized difference vegetation index(NDVI). In addition, as a result of analyzing the vulnerable area of thermal environment considering the demographic and socioeconomic characteristics of the heat island area, urban heat island areas of Seoul were significantly associated with the proportion of low-income elderly living alone. The result of this study provided useful insights for urban thermal environmental design and policy development that could improve the thermal environment for the socially disadvantaged urban population.

Key Words: Urban Heat Island Effect, Urban Thermal Environment, Climate Change, Socially Vulnerable Group, Spatial Statistics

1. 연구의 배경 및 목적

도시화와 고밀 개발로 인하여 개발밀도가 높은 도시 공간의 기온이 주변 지역보다 높아지는 도시열섬(urban heat island, UHI)현상이 발생하고 있고, 이러한 현상은 기후변화와 함께 강도가 점점 증가하고 있다. 특히, 고밀의 인구와 주거, 상업, 업무시설이 밀집해 있는 서울시의 경우, 국지적인 기상이변이 발생할 우려가 있으며, 연중 일 최고기온이 30℃ 이상인 열대일 수가 1970년 이후 지속적으로 증가하는 추세에 있다(서울연구원, 2010). 또한, 도시열섬현상으로 인한 에너지 사용증가, 열사병 등 열 관련 질환으로 말미암은 의료비용과 사회적 비용의 증가도 심각한 문제로 인식되고 있다.

이에 따라, 도시열섬을 완화하기 위한 건축 및 조경 분야를 중심으로 옥상녹화, 고반사 지붕, 차열성 포장, 식재 등의 다양한 방안들이 제안되고 있다. 더불어

기상청은 2008년부터 운영한 폭염특보를 연중으로 확대하고, 질병관리본부는 2012년부터 폭염으로 인한 건강피해 현황을 파악하기 위하여 '폭염으로 인한 온열질환 감시체계'를 실행하는 등 여름철 폭염 및 고온에 의한 피해를 최소화하기 위한 노력이 증가하고 있다(임숙향·곽진, 2015).

도시열섬현상에 관련한 국내연구는 주로 열섬현상을 유발시키는 물리적 특성에 집중하고 있다(오규식·홍재주, 2005; 김준식 외, 2015; 고동원·박승훈, 2019; 제민희·정승현, 2019). 그리고 도시열섬 저감을 위해 열환경 취약지역을 도출하고 물리적 환경의 특성 분석과 유형화에 대한 연구가 이루어지고 있다(구유성 외, 2015; 박정규 외, 2013, 최예슬 외, 2018). 하지만, 열환경에 대하여 사회·경제적 그리고 건강 측면에서의 취약계층에 대한 고려는 미흡한 실정이다. '2015년 폭염으로 인한 온열질환 신고현황 연보'(질병관리본부, 2015)에 의하면 2015년 온열질환자 수는 전

국 1,056명 중 65세 이상 인구가 280명으로 27%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 연령이 증가할수록 온열질환 발생이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 전체 온열질환자 중에서 폭염으로 사망한 11명 중 7명(63.6%)이 60세 이상의 노년층이었다. 노인과 어린이는 체온 조절 능력이 미흡하고, 특히 노인은 더위에 대한 내성이 낮고, 체내 수분량이 젊은 사람보다 적어 탈수상태에 이르기 쉽다(질병관리본부, 2014). 또한, 취약계층이 거주하는 쪽방의 경우 여름철 실내온도는 실외온도보다 약 3.2℃ 높았으며 습도가 높아 불쾌지수가 상승하는 등 폭염은 인구 및 사회·경제적 취약계층에게 더 치명적인 현상으로 볼 수 있다(기후변화 행동연구소, 2010).

이와 같이 사회적 취약계층은 폭염 및 도시열섬현상에 대한 대처능력이 부족하며, 이를 고려하지 않은 도시열섬 완화 전략은 환경적 그리고 건강적 측면에서 취약한 계층들의 사회적 소외를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구는 물리적 환경 특성에 더하여 인구 및 사회·경제적 관점을 모두 고려한 도시 열환경 취약지를 도출하고, 이를 통하여 향후 도시의 열섬완화 전략의 적용 및 관리에 필요한 정책적 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 도시열섬현상 관련 선행연구

1) 도시열섬현상과 물리적 환경

산업화와 인구의 집중으로 도시공간의 고밀개발과 토지피복의 변화, 에너지 사용으로 인한 건물과 자동차 배기가스에서 발생하는 인공열의 발생으로 도시 열섬현상이 발생하였다. 따라서 열섬완화를 위한 옥상녹화, 차열성포장, 공원조성 등 다양한 도시 설계적 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다(Onishi et al., 2010; Santamouris, 2014; 김용진 외, 2011; 홍창우, 2013; Li et al., 2019). 도시열섬현상과 물리적 환경에 관한 조희선 외(2014)의 연구는 여름철과 겨울철의 기상조건, 대기 질, 도시환경개선을 위한 정책적 노력, 도시공간 특성이 대기온도에 미치는 영향을 분석하였

다. 여름철과 겨울철의 평균 최저기온과 평균기온을 종속변수로 하며, 도시공간 특성요소, 환경보호노력, 대기오염, 기상조건으로 구분한 독립변수를 사용하였다. 분석결과, 여름철에는 교통량, 녹지비율, 하천비율, 평균풍속이 기온에 유의한 영향을 미쳤으며, 겨울철에는 주거 밀도, 교통량이 기온에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 교통량 분산 및 교통에너지의 저감이 수도권 열섬현상의 완화에 필수조건임을 밝혔다.

최근에는 도시의 열섬취약지역에 대한 물리적 환경요인과 더불어 토지피복 및 토지이용에 대한 연구도 진행되고 있다(여인에 외, 2009; 김준현·최진호, 2014; 김준식 외, 2015; Park et al., 2018; Stone et al., 2010). 김준현·최진호(2014)는 대구광역시를 대상으로 도시의 열섬 취약지역을 분석하였다. 이 연구는 공간통계기법을 활용하여 국지모란계수(Local Moran's I)를 통하여 대구시의 열환경 분포와 중심지를 파악하고 용도지역과 비교 및 분석하였다. 이와 유사한 연구로 김준식 외(2015)는 정규화식생지수(NDVI), 정규화시가화지수(NDBI), 정규화나지지수(NDBal)을 이용하여 군집분석을 통해 도시열섬 취약지역을 네 가지 유형으로 구분하고 토지이용 특징을 확인하였다. 도시열섬현상에 물리적으로 가장 취약한 유형의 특성은 일반공업지역 일대인 것으로 보고하였다. 그 다음으로 도시열섬은 도심 중심부에서 집중적으로 나타나며, 중심상업 지역을 중심으로 인근 주거지역이 열섬에 취약한 지역으로 나타났다.

2) 도시열섬현상과 사회적 취약계층

도시의 열섬현상에 미치는 물리적 환경에 대한 많은 연구에도 불구하고 도시의 열섬지역과 취약계층을 연계한 연구는 제한적이다(Harlan et al., 2006; Kim & Ryu, 2015; O'Neill, 2009; Tomlinson et al., 2011). 도시열섬 완화전략의 실행을 위한 열환경 취약지를 도출하기 위하여 사회적 취약계층을 고려한 최근 연구로 Norton et al.(2015)의 연구가 있다. 이 연구는 열환경에 대한 취약지를 열 노출, 취약성, 행동 노출의 세 가지로 정의하고, 각 요소 모두가 중복되는 지역을

열환경 취약지역으로 도출하였다. 열 노출은 기온이며, 취약성 지표는 5세 이하 인구, 65세 이상 노인인구 그리고 사회경제적 지수를 사용하였다. 또한, 공원 및 공공장소, 공공시설물(교육, 건강, 커뮤니티, 교통 시설 등), 혼합용도지역(주거·비주거), 상업지역 등을 통하여 행동노출 지표를 산정하였다. 이 연구는 기존의 연구 주제였던 대기온도와 물리적 환경에서 나아가 취약계층 지표를 고려하여 열환경 취약지를 도출하였다는 데 의의가 있다.

취약계층을 고려한 국내 연구로 이나영 외(2014)는 서울시 25개구의 65세 이상 고령자를 대상으로 폭염과 밀접한 상관관계가 있는 호흡기계 및 심혈관계 질환 사망률에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 이 연구는 여름철을 대상으로 65세 이상 호흡기계 및 심혈관계 질환 사망자 비율을 종속변수로 하는 고정효과 모형을 사용하였다. 주요 설명변수는 열지수, 녹지면적, 병원 및 의원 수, 소득이 없는 노인, 65세 이상 독거노인, 환경오염물질 배출시설 수를 포함하고 있다. 결론적으로 질병 및 질환, 소득수준 등 65세 이상 노인의 열 취약성에 초점을 맞추어 진행되었지만, 분석 단위가 시군구 단위이며, 국지적인 폭염 및 열섬현상과 사회·경제적 취약계층의 상관성을 분석하기에는 한계를 가지고 있다.

더 나아가 도시공간의 물리적 특성과 취약계층을 고려한 열환경 취약지표를 산정하기 위한 연구로 윤성권 외(2013)는 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)의 취약성 개념을 활용하여 기후 노출, 민감도, 적응능력 지표를 구성하고 열환경 취약성을 평가하였다. 분석의 결과, 기반시설과 인프라가 부족한 지역과 장애인, 기초생활수급자, 임대주택의 비중이 상대적으로 높은 지역이 취약성 지수가 높게 산출되었다. 신호성·이수형(2014)은 건강 분야에 활용할 수 있는 기후변화 취약성 지표의 개발을 목적으로 연구를 진행하였다. 지표는 기상요소, 질환 분포, 환경영향, 취약계층, 사회여건 및 건강발현요소, 보건의료 체계로 여섯 개로 구분되며 매개체 감염병, 폭염, 홍수, 대기오염 및 알레르기 네 개의 건강분야에 대하여 비보상성 다기준 합산법을 통하여 분석하였다. 이

연구는 기상요소와 물리적 환경요인을 더하여 취약계층, 질환, 사회적 여건, 의료체계 등 폭염과 관련한 다양한 지표들을 사용하였지만, 이나영 외(2014)와 마찬가지로 시·도 단위로 분석이 이루어져 공간단위 수준에서 동일한 한계점을 가지는 것으로 볼 수 있다.

3) 연구의 차별성

도시열섬에 대한 국내 대부분의 선행연구는 주로 위성영상을 통한 지표온도와 자동기상측정망(Automatic Weather Stations: AWS)으로부터 대기온도 자료를 활용하여 지표나 대기온도에 영향을 미치는 물리적 환경 분석에 초점을 맞추고 있다. 특히 도시의 공원·녹지와 수공간의 온도 저감효과에 대한 연구가 많이 진행되었다. 또한, 열환경 개선을 위한 옥상녹화, 쿨루프 등 건축 및 조경 측면에서 시뮬레이션이나 실제 측정을 통한 열섬저감 효과를 분석하고 있다. 그러나 도시열섬현상 또는 폭염에 대한 대처능력이 부족한 인구 및 사회·경제적 취약계층을 고려한 도시 열환경 취약지역에 대한 분석은 일부 진행되고 있으나 아직은 미흡한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 기존의 연구에서 고려되었던 기후특성과 물리적 환경 특성에 더불어 인구 및 사회·경제적 특성을 고려하여 열환경 취약지역을 확인하였다. 나아가 열섬지역의 물리적 환경과 취약계층의 사회·경제적 특성을 분석하고 사회·경제적 취약계층을 고려한 열환경 취약지역 관리를 위한 정책적 시사점을 도출하였다.

3. 도시 열환경 취약지역 분석

1) 연구의 범위 및 방법

본 연구는 서울특별시를 대상으로 열섬지역과 사회·경제적 취약계층을 고려한 열환경 취약지역을 분석하였다(〈그림 1〉 참조). 공간적 분석단위는 행정동 수준을 사용하였다. 행정동을 공간분석 단위로 설정한 이유는 취약계층의 분석에 필요한 인구, 사회, 경제적 지표들이 행정동 단위로 집계되어 있기 때문이다. 연구의 방법론으로 서울시의 열섬지역을 분석



〈그림 1〉 연구의 공간적 범위

하기 위해 공간통계분석 기법에서 사용하는 공간적 자기상관 지표인 국지모란계수(Moran's I) 값을 활용하여 핫스팟(hotspot) 분석을 실행하였다.

서울시의 열환경 자료는 USGS에서 제공하는 Landsat 8 위성영상을 활용하여 지표온도를 대기온도로 전환하여 사용하였고, 행정동별 물리적 환경변수는 과세대장, 새주소사업 DB 등을 통해 구축하였다. 행정동별 인구, 사회, 경제적 변수는 서울시 열린데이터 광장에서 제공하는 공식적인 통계자료를 활용하였다.

2) 자료의 구축

(1) 변수의 설정

본 연구에서는 인구 및 사회·경제적 특성을 고려한 열환경 취약지역을 분석하기 위해 다음과 같은 변수를 사용하였다(〈표 1〉 참조). 분석에 사용된 변수는 행정동별로 집계된 기후특성, 인구 특성¹⁾, 사회·경제적 특성, 토지이용특성으로 구분되며, 선행연구에서

〈표 1〉 분석 변수의 정의 및 기초통계량

변수 및 설명		관측수	평균	표준편차	최솟값	최댓값	출처
기후 특성	대기온도: Landsat 8 위성영상을 변환한 동별 대기온도	423	30.888	0.176	30.341	31.426	USGS (2014)
인구 특성	5세 이하 인구 비율: 5세 이하 인구/동별 인구	423	0.040	0.011	0.015	0.091	통계청 (2010) 인구주택 총조사
	65세 이상 인구 비율: 65세 이상 인구/동별 인구	423	0.100	0.022	0.051	0.178	
	독거노인 비율: 독거노인 인구/동별 인구	423	0.032	0.019	0.001	0.173	
사회·경제적 특성	기초생활수급자 비율: 기초생활수급자 인구/동별 총 인구	423	0.022	0.024	0.000	0.320	서울시 열린데이터 광장 (2014)
	기초생활수급 독거노인 비율: 기초생활수급 독거노인 인구/동별 인구	423	0.005	0.005	0.000	0.040	
	전력사용량 비율: 동별 세대당 전력 사용량	423	3.187	0.476	1.820	5.050	
토지 이용 특성	주거시설 연면적 비율: 주거시설 연면적/동별 시가화 면적	423	0.492	0.276	0.001	1.978	과세대장 (2013)
	상업시설 연면적 비율: 상업시설 연면적/동별 시가화 면적	423	0.345	0.356	0.011	3.456	
	업무시설 연면적 비율: 업무시설 연면적/동별 시가화 면적	423	0.024	0.044	0.000	0.242	
	용적률: (건축 바닥면적*층수)/동별 시가화면적	423	1.110	0.435	0.007	3.128	과세대장 (2013)
	불투수면 비율: (도로면적+건축면적)/동 면적	423	0.408	0.164	0.051	0.775	새주소사업 DB (2014)
	녹지 및 오픈 스페이스 비율: 생태현황도의 녹지 및 오픈 스페이스	423	0.085	0.108	0.000	0.617	서울시 생태현황도
	수계면적 비율: 수계면적/동별 시가화 면적	423	0.016	0.030	0.000	0.222	새주소사업 DB (2014)
	Normalized Difference Vegetation Index(NDVI): Landsat 8 영상을 변환한 NDVI	423	0.165	0.042	0.097	0.300	USGS (2014)
	Albedo: Landsat 8 영상을 변환한 Albedo	423	0.154	0.007	0.138	0.183	

사용된 변수들을 고려하여 설정하였다. 변수에 대한 기초통계량은 <표 1>에 제시하였다.

(2) 대기온도

동별 평균 대기온도는 United States Geological Survey(USGS)에서 제공하는 Landsat 8의 2014년 5월 30일의 위성자료를 활용하여 지표온도 및 대기온도를 산출하였다. 2014년 5월 30일의 위성자료는 운량이 0%이며 영상자료의 질이 9로서 분석에 사용하기 적합하다고 판단하였다(<표 2> 참조). Landsat 위성영상은 밴드별로 정량화된 복사에너지의 값을 가지고 있기 때문에 대기온도 값을 얻기 위해서는 변환과정이 필요하다. 대기온도 산출 공식은 USGS에서 제공하는 LANDSAT8 Data Users Handbook(USGS, 2015, pp.61-62)을 사용하였다.

<표 2> Landsat 8 위성영상 데이터 설명

구분	자료 정보
촬영날짜	2014.05.30
촬영시간	11:10 am
운량	0.0%
영상 질	9
태양각	66.72°

지표온도는 위성영상 자료의 Band10을 사용하여 식 (1)을 따라 Digital Number(DN) 값을 분광복사량(L_λ)으로 변환한다. Band 10의 환산계수와 보정상수는 <표 3>과 같다.

<표 3> Band 10의 환산계수와 보정상수 값

구분	상수 값
Band	Band 10
M_L	0.0003342
A_L	0.1
$K1$	774.89
$K2$	1321.08

$$L_\lambda = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad \text{식 (1)}$$

L_λ : 분광복사량

M_L : 배수 환산계수

A_L : 가산 환산계수

Q_{cal} : DN(Digital Number)

식 (1)을 통해 계산된 분광복사량(L_λ)을 지표온도로 변환하기 위한 식은 (2)와 같다.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad \text{식 (2)}$$

T : 지표온도(°C)

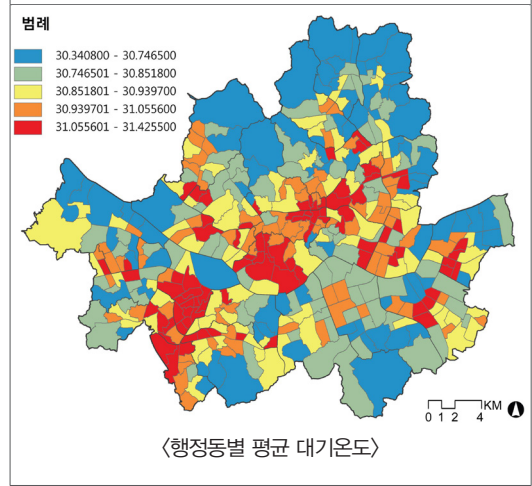
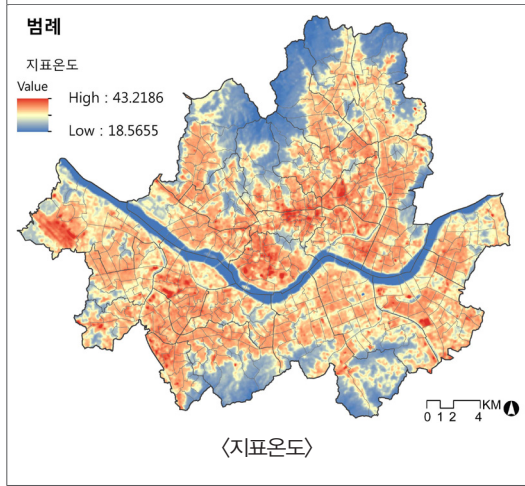
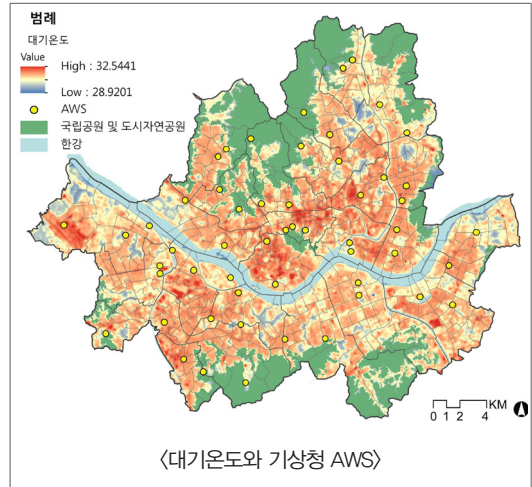
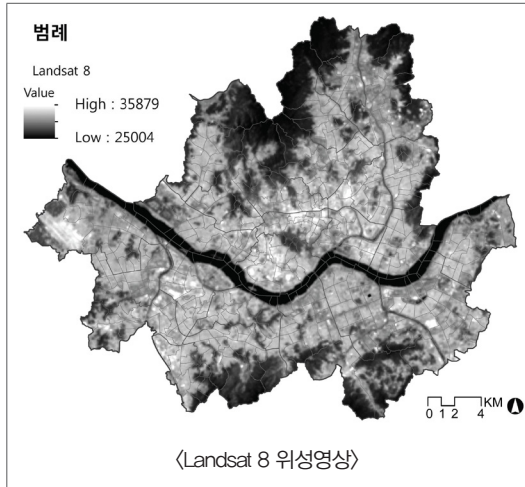
L_λ : 분광복사량($W/m^2 \times sr \times \mu m$)

$K1, K2$: 열 변환 상수

다음으로 지표온도를 대기온도로 변환시키기 위해 오규식·홍재주(2005)에서 개발한 방법을 사용하였다. 이 연구는 AWS의 실측기온과 Landsat 위성영상 값을 회귀 분석하여 지표온도를 대기온도로 전환하는 방법을 제시하고 있다. Landsat의 지표온도를 대기온도로 보정하기 위해 GIS의 Focal statistic을 사용하여 격자 중심으로부터 행과 열을 1부터 33개까지 구성한 뒤, 주변 격자의 온도 값을 고려하여 중심 격자의 평균온도를 구하였다. 그 결과, 가장 높은 상관성을 가지는 9×9 격자의 평균 온도와 AWS의 실측 대기온도를 회귀 분석하여(식 (3) 참조) 대기온도로 변환하였다(제민희·오규식, 2015).

$$y = 26.191 + 0.147x \quad \text{식 (3)}$$

변환 결과, 서울시 최저 지표온도는 18.6°C, 최고 지표온도는 43.2°C로 나타났다(<그림 2> 참조). 또한, 지표온도를 대기온도로 변환한 결과, 최저 대기온도는 28.9°C, 최고 대기온도는 32.5°C로 확인되었다. 그러나 국립공원, 도시자연공원과 같은 녹지와 한강의 수계는 동별 평균 대기온도를 산출할 때, 평균치를 낮추어 왜곡시킬 수 있으므로 제외하였다. 서울시 423개 행정동 대상으로 평균 대기온도를 산출한 결과는 <그림 3>과 같다.



〈그림 2〉 Landsat 8 위성영상과 지표온도

〈그림 3〉 대기온도와 행정동별 평균 대기온도

(3) 정규화식생지수(NDVI)

식생지수는 식생분포면적, 수종 등의 식생의 밀집도를 정량적으로 나타내기 위한 척도로, 파장대의 반사특성을 이용하여 분광대 간 특성을 조합하여 구한다(권혁춘·이병걸, 2009). 식생지수를 구하는 다양한 방법 중 가장 일반적으로 사용되고 있는 정규화식생지수(NDVI)는 가시광선과 근적외선 영역에서 녹색식물의 반사율 차이가 크게 나는 것을 이용하여, 본 연구에서는 Band4와 Band5를 사용하여 식 (4)을 통하여 계산한다. NDVI는 단위가 없고, -1에서 +1의 값을 가지며 +1에 가까울수록 식생의 상대적 분포량과 활동성이 높은 것을 의미한다(이근상·최연웅, 2014).

$$NDVI = \frac{(Band5) - (Band4)}{(Band5) + (Band4)} \quad \text{식 (4)}$$

(4) 반사율(Albedo)

반사율은 입사된 태양복사 에너지가 반사되는 비율로 정의되며(이준호·윤성환, 2014), 토지피복과 토양의 수분량, 태양광의 입사각도 등 다양한 요인에 의하여 변화한다. Landsat 8 위성영상의 Band 2, 4, 5, 6, 7을 사용하여 Liang(2000)이 개발한 알고리즘을 정규화한 Smith(2010)의 공식을 참조하여 Albedo 값을 산출하였다.

4. 분석결과

1) 도시 열섬지역 Hotspot 분석

서울시 행정동별 평균대기온도의 공간적 종속성(spatial dependency)을 확인하고 군집된 열섬지역을 도출하기 위하여 대기온도의 공간적 자기상관(spatial autocorrelation)지수인 국지모란계수(local Moran's I) 값을 활용하여 Hotspot 분석을 실행하였다.²⁾ 평균 대기온도를 이용한 국지적 모란지수를 활용하면 대기온도가 높은 행정동 주변에 동일하게 대기온도가 높은 행정동이 집중되어 있을 때 핫스팟을 의미하는 대기온도의 High-High 지역을 도출할 수 있다. 마찬가지로 대기온도가 낮은 값이 집중된 지역(Low-Low), 높은 대기온도로 둘러싸인 낮은 대기온도를 갖는 지역(Low-High), 낮은 대기온도로 둘러싸인 높은 대기온도를 갖는 지역(High-Low) 등을 도출할 수 있다.

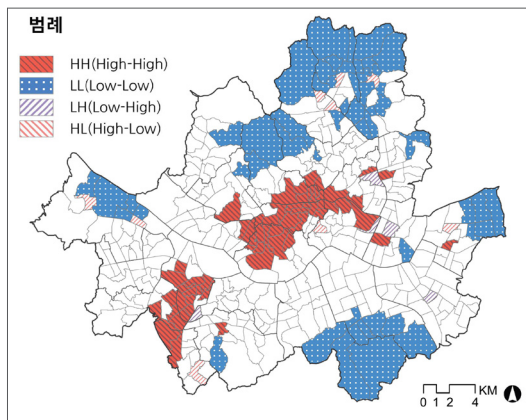
Geoda 1.6.7을 이용하여 국지모란계수 값을 분석한 결과, 주로 도심지역인 서울시 중구, 종로구, 용산

구, 영등포구에서 High-High 지역이 두드러지게 나타났다(그림 4) 참조). 그리고 북한산과 도봉산이 분포하고 있는 종로구, 성북구, 도봉구와 우면산, 청계산, 인능산, 대모산이 있는 서초구 강남구에서 Low-Low 군집이 나타났다. 본 연구에서는 Hotspot을 통해 분석한 High-High 지역인 62개 행정동을 열섬지역으로 선정하였다.

2) 도시열섬지역의 물리적 환경특성 분석

도시열섬지역 도출을 위한 Hotspot 분석 결과는 423개 행정동 중에서 62개 행정동을 열섬지역인 그룹 1(HH)으로 선정하였으며, 나머지 361개 행정동을 그룹 2(LL, LH, HL)로 구분하여 우선적으로 분산분석(ANOVA)을 실행하였다(표 5) 참조). 분산분석 결과 통계적으로 유의한 변수를 설명하면 열섬지역은 다른 지역에 비해 평균적으로 상업과 업무시설의 연면적이 상대적으로 높고, 불투수면의 비율이 높고, 녹지 및 오픈스페이스의 비율이 적고, 정규화식생지수가 낮은 곳에 해당하였다. 주거시설의 연면적 비율, 용적율, 수계면적, 그리고 반사율은 ANOVA 분석에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

그룹별 평균값에 대한 분산분석은 그룹별 평균의 차이만을 검정하기 때문에 다른 변수의 영향력을 고려할 수 없는 문제가 있다. <표 6>은 열섬지역의 물리적 환경특성을 로지스틱 분석을 통해 살펴보았다. 분석의 결과, 주거시설 연면적, 상업시설 연면적, 불투수포장면은 열섬지역과 양(+)의 관계를 가지는 것으로 나타났으며, 용적률과 NDVI는 음(-)의 관계를 가지는 유의한 변수로 나타났다(<표 6> 참조). 이는, 주거시설과 상업시설의 연면적이 높은 지역, 즉 주거시



<그림 4> 도시열섬지역 도출을 위한 Hotspot 분석결과

<표 4> Hotspot 지역 유형별 기초통계량 분석

구분	관측 수(%)	평균	표준편차	최솟값	최댓값
High-High(HH)	62(14.7)	31.075	0.108	30.905	31.426
Low-Low(LL)	53(12.5)	30.680	0.122	30.341	30.882
Low-High(LH)	5(1.2)	30.826	0.044	30.774	30.872
High-Low(HL)	9(2.1)	30.939	0.036	30.894	31.010
기타	294(69.5)	30.885	0.154	30.428	31.299
합계	423(100.0)	30.888	0.176	30.341	31.426

〈표 5〉 도시열섬지역의 물리적 환경 특성 ANOVA 분석

구분	그룹 1. 도시열섬지역 평균	그룹 2. 기타 지역 평균	평균 차이 (그룹 1-그룹 2)	F	p-value
주거시설 연면적 비율	0.466	0.496	-0.031	0.65	0.421
상업시설 연면적 비율	0.581	0.304	0.277	34.67 ***	0.000
업무시설 연면적 비율	0.046	0.020	0.026	20.23 ***	0.000
용적률	1.163	1.101	0.061	1.05	0.306
불투수면 비율	0.522	0.388	0.133	38.03 ***	0.000
녹지 및 오픈스페이스 비율	0.045	0.092	-0.047	10.42 ***	0.001
수계 면적 비율	0.015	0.016	-0.001	0.10	0.749
정규화식생지수(NDVI)	0.134	0.170	-0.037	44.20 ***	0.000
반사율(Albedo)	0.153	0.154	-0.001	1.08 ***	0.300

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

〈표 6〉 도시열섬지역 물리적 환경특성 로지스틱 회귀분석

변수		Coef.	z	p>z
물리적 환경 특성	주거시설 연면적 비율	5.396 ***	3.63	0.000
	상업시설 연면적 비율	5.121 ***	4.51	0.000
	업무시설 연면적 비율	4.979	1.57	0.115
	용적률	-6.070 ***	-4.15	0.000
	불투수면 비율	3.370 *	1.90	0.057
	녹지 및 오픈스페이스 비율	-0.411	-0.14	0.888
	수계 면적 비율	-3.763	-0.63	0.526
	정규화식생지수(NDVI)	-23.521 **	-2.54	0.011
	반사율(Albedo)	0.001	1.23	0.218
Constant		-9.664	-0.97	0.331
Number of obs =		423		
LR chi2(7) =		101.45 ***		
Pseudo R ² =		0.288		

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

설과 상업시설이 밀집해 있는 지역일수록 도시의 열섬현상에 취약한 지역임을 의미한다. 또한, 용적률이 낮을수록, 불투수면이 높을수록, NDVI가 낮을수록 열 취약지역임을 도출하였다.

도시의 불투수면이나 정규화식생지수에 대한 결과는 선행연구와 유사한 결과이다. 그러나 용적률의 경우, 용적률이 낮은 지역이 열섬지역으로 나타났다. 다시 말해서, 서울시의 열섬지역은 주거와 상업시설이 밀집해 있으면서 용적률이 낮은 곳으로, 서울시 도심 주변의 주·상 복합지역과 공업용도가 밀집된 영등포, 금천, 구로지역으로 나타났다.

3) 인구 및 사회·경제적 특성 분석

열섬지역의 물리적 환경특성 분석에 이어서 열 노출 및 열 적응능력과 관련하여 신체적 또는 경제적으로 대처능력이 미흡한 계층을 대변할 수 있는 변수를 구축하여 ANOVA와 로지스틱 회귀 분석을 실시하였다. 취약계층은 5세 이하 인구, 65세 이상 인구, 독거노인으로 구성된 인구특성과 기초생활수급 독거노인, 주택용 전력사용량으로 이루어진 사회·경제적 특성으로 구분하였다. 주택의 전력사용량 변수는 열 노출과 관련하여 저소득층은 상대적으로 열섬현상이 심각한 상황에서 냉방기 사용이 어렵거나 제한적일 수 있

〈표 7〉 도시열섬지역 인구 및 사회·경제특성 변수 ANOVA 분석

구분	그룹 1. 도시열섬지역 평균	그룹 2. 기타 지역 평균	평균 차이 (그룹 1-그룹 2)	F	p-value
5세 이하 인구	0.037	0.041	-0.004	7.41 ***	0.007
65세 이상 인구	0.113	0.098	0.015	23.8 ***	0.000
독거노인 인구	0.046	0.029	0.017	43.83 ***	0.000
기초생활수급 독거노인	0.009	0.005	0.004	36.19 ***	0.000
기초생활수급자	0.028	0.021	0.007	4.73 **	0.030
세대당 전력사용량	3.173	3.189	-0.017	0.06	0.800

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

〈표 8〉 도시열섬지역 인구 및 사회·경제적 특성 로지스틱 회귀분석

변수		Coef.	z	p>z
인구특성	5세 이하 인구 비율	-18.722	-1.16	0.246
	65세 이상 인구 비율	6.855	0.79	0.429
	독거노인 인구 비율	18.971	1.26	0.206
사회·경제적 특성	기초생활수급 독거노인 비율	159.098 **	2.48	0.013
	기초생활수급자 비율	-27.213 ***	-2.87	0.004
	세대당 전력사용량	0.515	1.57	0.115
Constant		-4.413 **	-3.03	0.002
Number of obs =		423		
LR chi2(7) =		47.32 ***		
Rseudo R ² =		0.134		

* p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01

기 때문이다.

우선 분산분석(ANOVA) 결과는 세대당 전력사용량 변수를 제외하고 모두 도시열섬지역과 기타 지역 간에 평균의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(〈표 7〉 참조). 열섬지역의 인구, 사회 및 경제적 특성은 5세 이하 인구의 비율이 낮고, 65세 이상 인구의 비율이 높고, 독거노인과 기초생활 수급자의 비율이 상대적으로 높게 나타났다.

〈표 8〉은 도시열섬지역의 인구, 사회 및 경제적 특성에 대한 로지스틱 회귀분석의 결과이다. 분석의 결과 기초생활수급 독거노인 인구, 기초생활수급자 변수가 유의하게 나타났다. 이는 서울시의 도시열섬지역이 독거노인 인구의 비율과 기초생활수급 독거노인 인구의 비율이 높은 행정동에 집중되어 있음을 의미한다. 그러나 열섬지역의 경우 기초생활수급자의 비

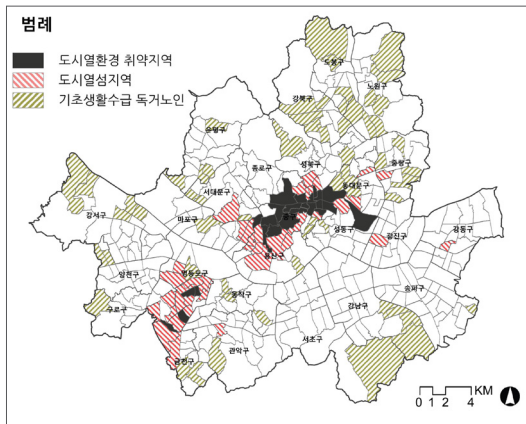
율은 주변 지역과 비교할 때 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이는 대부분의 기초생활수급자들이 도시 주변부의 저소득층 주거지역에 많이 거주하기 있기 때문으로 판단된다. 그러나 〈표 8〉에서 행정동의 기초생활 수급자의 비율이 동일하다고 가정할 때, 열섬지역에는 기초생활수급을 하는 독거노인의 비율이 상대적으로 높은 것을 의미한다. 이러한 결과는 경제적 능력이 부족하거나 혼자 거주하는 독거노인과 같은 취약계층을 고려한 열섬현상 저감 대책이 필요한 것으로 판단된다.

4) 도시 열환경 취약지역 도출

도시 열섬지역 Hotspot 분석을 통해 도출한 도시열섬지역과 인구 및 사회·경제적 특성 로지스틱 회귀분석 결과로 나타난 유의한 변수 중 기초생활수급 독거

노인 변수의 상위 20%를 도면에 중첩한 결과는 <그림 5>와 같다. 본 연구에서 도출된 열환경 취약지역은 중구에서 8개 동으로 가장 많이 나타났으며, 종로구 5개 동, 영등포구 3개 동으로 열환경 취약지가 밀집해 있음을 확인하였다. 이와 같이 나타난 서울시의 열환경 취약지역은 주로 구도심과 부도심 주변에 밀집하고 있는 것으로 나타났다. 도시열환경 취약지역은 여름철에 도시열섬현상이 발생할 확률이 높고 열환경 취약계층의 비율이 상대적으로 높은 지역을 의미한다.

도시열환경 취약지의 도출은 도시에서 주변 지역보다 대기온도가 상대적으로 높은 도시열섬지역의 분포 뿐만 아니라 도시열섬지역과 사회·경제적 취약계층이 집중적으로 분포하고 있는 지역을 열섬저감을 위한 정책적 우선순위 지역으로 활용할 수 있다.



<그림 5> 사회적 취약계층을 고려한 열환경 취약지역 분석

5. 결론

본 연구는 서울시를 대상으로 기후변화와 함께 심각한 사회문제로 대두되고 있는 도시열섬현상 지역의 물리적 환경특성과 인구 및 사회경제적 특성을 고려한 열환경 취약지역을 도출하였다.

도시열섬지역의 물리적 환경 특성을 살펴볼 수 있는 로지스틱 회귀분석 결과, 서울시의 도시열섬지역은 주거시설과 상업시설 연면적이 높으며 불투수포장면 비율이 높고 용적률과 정규화식생지수(NDVI)가

낮은 특성을 갖는 것으로 나타났다. 공간적 분포는 주로 강북의 중구, 종로구, 성동구 등 도심 주변과 과거 공업용도가 밀집되었던 영등포, 금천, 구로구 지역에 열섬현상이 집중되어 있는 것으로 나타났다. 이 지역은 강남지역에 비해 용적율은 상대적으로 낮지만, 높은 불투수면과 오래된 중·저층 건물이 밀집되어 있어 바람의 통과도 원활하지 못한 지역으로 볼 수 있다.

서울시 도시열섬지역의 인구 및 사회·경제적 특성을 분석한 결과 서울시의 열섬지역은 기초생활수급자의 비율이 기타 지역에 비해 평균적으로 높은 것은 아닌 것으로 나타났다. 이는 기초생활수급자의 분포가 도심 주변의 낙후된 주거지역과 접근성이 낮은 서울시 외곽 저소득층 주거지에 분산되어 분포하고 있기 때문이다. 그러나 서울시의 열섬지역은 기초생활수급을 받는 독거노인의 비율이 높은 것으로 나타났다. 이는 여름철 도시열섬 현상이 발생할 때 대처능력이 떨어지는 저소득 독거노인 밀집 주거지에 대한 열환경 개선 방안과 적응능력 향상이 중요함을 의미한다.

본 연구의 결과는 서울시 도시 열섬현상의 저감과 사회·경제적 취약계층의 여름철 열환경 개선을 위해 도시계획 및 설계 측면에서 다음과 같은 정책적 시사점을 제시한다.

첫째, 불투수면과 정규화식생지수는 기존연구와 유사하게 도시열환경 개선에서 핵심적인 요소임을 확인하였다. 본 연구에서 정규화식생지수는 다른 물리적 특성 변수에 비하여 열섬지역에 매우 큰 영향력을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 도시계획 및 설계에 있어서 토지피복의 변화를 통한 열섬완화 전략이 여전히 중요함을 시사한다.

둘째, 서울시 도시열섬지역은 열환경의 변화에 대응능력이 부족한 저소득층 독거노인의 비중이 높은 것으로 나타났다. 이는 도시공간의 물리적 특성에 더하여 사회적 취약계층을 고려한 도시열섬현상저감 대책이 마련되어야 함을 시사한다. 특히, 도심 주변의 저소득층 주거지역에 밀집하고 있는 취약계층을 위한 정책과 프로그램이 뒷받침될 필요가 있다. 기초생활수급을 받고 있는 저소득층 독거노인은 대부분 건강상태가 좋지 않고 열섬현상이 발생할 때 대처능력이

매우 미흡하기 때문이다.

마지막으로, 도시열섬현상 저감의 정책적 지원에 있어서 우선순위를 위한 도시열환경 취약지역의 도출은 단순히 대기온도가 높은 도시열섬지역에서 나아가 인구 및 사회·경제적 취약계층이 집중되어 있는 지역을 함께 고려해야 함을 시사한다. 따라서 이 연구는 서울시의 열섬완화 전략과 사회·경제적 취약계층을 고려한 열환경 취약지역의 관리에 필요한 정책적 기초자료로 도움이 될 수 있다.

본 연구는 도시열섬지역의 물리적 환경 특성분석에 더불어 기존의 연구에서 고려가 미흡하였던 인구 및 사회·경제적 취약계층 특성을 연구 분석에 활용하였다. 분석에 사용한 Landsat 8 위성영상 자료의 시기가 가장 더웠던 날을 대표하지 못한다는 한계가 있다. 이는 위성이 약 15일마다 우리나라의 상공에서 영상을 촬영하고, 강우와 구름의 영향이 없는 날짜를 선택하는 과정에서 위성사진 자료 구득의 어려움이 있기 때문이다. 또한, 이 연구는 위성사진의 지표온도에 의존하여 대기온도를 추정하여 사용하였기 때문에 실제 대기온도와 차이를 가질 수 있다.

향후 후속 연구는 지표온도에서 추출한 대기온도보다는 실제 측정된 대기온도 자료를 활용하여 도시열섬지역을 좀 더 정확하게 도출하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 도시의 대기온도에 영향을 미치는 도시의 평면적인 물리적 환경 특성뿐만 아니라 토지와 건물이용의 입체적 특성과 건물과 자동차에서 발생하는 인공열을 종합적으로 고려한 분석이 필요하다고 판단된다. 그리고 나아가 폭염과 같은 도시열환경의 변화가 인구 및 사회경제적 취약계층의 건강과 일상생활에 미치는 영향을 분석하고 열환경 개선을 위한 정책적 시사점을 도출할 필요가 있다.

주

- 1) 인구특성 변수에서 연령대별 비율은 2014년 행정동 수준의 자료가 활용 가능하지 않아 2010년 인구주택 총조사 자료를 활용하였다.
- 2) Hotspot 분석은 Geoda 1.6.7을 활용하였으며, 서울시 행정동의 공간가중치행렬(spatial weights matrix)은 second order queen contiguity 방법을 사용하여 계산하였다.

참고문헌

- 고동원·박승훈, 2019, 근린환경특성과 도시열섬현상과의 상호관계에 관한 연구, 『도시설계』, 제20권 3호, pp. 55-67.
- 구유성·김자은·김지숙·이성호, 2015, 폭염 취약성 평가를 통한 도시의 적응능력 향상, 『한국지역개발학회지』, 제27권 5호, pp. 331-347.
- 권혁춘·이병길, 2009, Landsat TM 영상을 이용한 제주도 도심지역 지표면온도분포와 식생지수의 상관성 분석, 『한국지형공간정보학회지』, 제17권 4호, pp. 39-44.
- 기후변화행동연구소, 2010, 폭염이 서울시 쪽방촌 독거노인에 미치는 건강영향 조사, 서울:기후변화행동연구소.
- 김용진·강동화·안건혁, 2011, 기후변화에 따른 도시열섬현상 특성 변화와 도시설계적 대안 모색에 관한 기초 연구, 『도시설계』, 제12권 3호, pp. 5-14.
- 김준식·이동근·성선용·정승규·박종훈, 2015, 정규화 지수를 이용한 토지이용에 따른 도시열섬 취약지 특성분석, 『국토계획』, 제50권 5호, pp. 59-72.
- 김준현·최진호, 2014, Landsat-8을 활용한 대도시 열환경구조 분석, 『한국측량학회지』, 제32권 4-1호, pp. 327-333.
- 박정규·배현주·서양원, 2013, 『기후환경 취약계층의 환경복지 정책연구(I)』, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- 서울연구원, 2010, 기상이변에 대한 서울시 취약지역 대응방안, 서울: 서울연구원, 정책과제 연구보고서.
- 신호성·이수형, 2014, 기후변화 건강 취약성 평가지표 개발, 『환경정책연구』, 제13권 1호, pp. 69-93.
- 여인애·이정재·윤성환, 2009, 도시의 건폐율 및 용적률이 도시기후에 미치는 영향 분석, 『한국태양에너지학회 논문집』, 제29권 3호, pp. 19-27.
- 오규식·홍재주, 2005, 도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구, 『도시설계』, 제6권 1호, pp. 47-63.
- 윤성권·최봉석·전의찬, 2013, 시흥시 기후변화 취약성 평가 연구, 『한국기후변화학회지』, 제4권 1호, pp. 1-10.
- 이근상·최연웅, 2014, 객체기반 영상분석 기법에 의한 낙동강 유역 토지피복 분류, 『한국지적정보학회지』, 제16권 3호, pp. 3-18.
- 이나영·조용성·임재영, 2014, 폭염으로 인한 기후변화 취약계층의 사망률 변화 분석: 서울을 중심으로, 『보건사회연구』, 제34권 1호, pp. 456-484.
- Li, Y. 이수기·한재원, 2019, 도시의 3차원 물리적 환경변수와 지표온도의 관계분석, 『국토계획』, 제54권, 2호,

- pp. 93-108.
- 이준호·윤성환, 2014, 위성영상을 활용한 생태피복도 작성과 E-GIS DB 구축, 『대한건축학회 논문집-계획계』, 제30권 9호, pp. 205-212.
- 임숙향·곽진, 2015, 2015년 온열질환 감시체계 운영결과, 『주간건강과질병』, 제8권 38호, pp. 906-908.
- 제민희·오규식, 2015, 옥상녹화와 쿨루프에 의한 도시 열환경 개선효과 분석, 『대한국토·도시계획학회 2015 추계학술대회 발표논문』.
- 제민희·정승현, 2019, 토지이용 유형별 도시열섬강도 분석, 『한국콘텐트학회논문지』, 제18권 11호, pp. 1-12.
- 조희선·정유진·최막중, 2014, 도시공간특성이 열섬현상에 미치는 영향, 『환경정책』, 제22권 2호, pp. 27-43.
- 질병관리본부, 2014, 폭염 대응 건강관리 사업안내, 보건복지부, 질병관리본부.
- 질병관리본부, 2015, 2015년 폭염으로 인한 온열질환 신고 현황 연보, 보건복지부, 질병관리본부.
- 최예술·김재원·임업, 2018, 서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력 취약지역 분석, 『국토계획』, 제53권 7호, pp. 87-107.
- 홍창우, 2013, 고반사 도료를 사용한 차열성 아스팔트 도로 포장의 온도저감특성, 『대한토목학회논문집』, 제33권 1호, pp. 317-327.
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prasad, L., Stefanov, W. L., Larsen, L., 2006, Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress, 『Social Science & Medicine』, 63(11), pp. 2847-2863.
- Kim, S., Ryu, Y., 2015, Describing the spatial patterns of heat vulnerability from urban design perspectives, 『International Journal of Sustainable Development & World Ecology』, 22(3), pp. 189-200.
- Liang, S., 2001, Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, 『Remote Sensing of Environment』, 76(2), pp. 213-238.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., Williams, N. S., 2015, Planning for cooler cities: A framework to priorities green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes, 『Landscape and Urban Planning』, 134, pp. 127-138.
- O'Neill, M. S., Carter, R., Kish, J. K., Gronlund, C. J., White-Newsome, J. L., Manarolla, X., Zanolotti, A., Schwartz, J. D., 2009, Preventing heat-related morbidity and mortality: New approaches in a changing climate, 『Maturitas』, 64(2), pp. 98-103.
- Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., Imura, H., 2010, Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots, 『Urban Forestry & Urban Greening』, 9(4), pp. 323-332.
- Park, C., Ha, J., Lee, S. 2017, Association between three-dimensional built environment and urban air temperature: Focused on seasonal and temporal differences, 『Sustainability』, 9(8), 1338: 1-16.
- Santamouris, M., 2014, Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, 『Solar Energy』, 103, pp. 682-703.
- Smith, R. B., 2010, The heat budget of the earth's surface deduced from space, available on http://www.yale.edu/ceo/Documentation/ceo_faqs.html.
- Stone, B., Hess, J. J., Frumkin, H., 2010, Urban form and extreme heat events: Are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities, 『Environmental Health Perspectives』, 118(10), pp. 1425-1428.
- Tomlinson, C. J., Chapman, L., Thornes, J. E., Baker, C. J., 2011, Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: A case study for Birmingham, UK, 『International Journal of Health Geographics』, 10(42), pp. 1-14.
- USGS, 2015, Landsat 8(L8) data users handbook, available on <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.

게재신청 2019.11.26.

심사일자 2019.12.04.

게재확정 2019.12.16.

주저자: 조혜민, 교신저자: 이수기, 공동저자: 하재현