

도시화 엔트로피와 도시 열현상과의 관계성*

강상준**

A Relation of Urbanization Entropy and Urban Heat Phenomenon*

Sangjun Kang**

국문요약 본 연구에서 다루게 될 도시계획 이슈는 도시화 과정에서 흔히 부정적인 스프롤 현상의 물리적 형태 중 하나로 인식되는 도시 파편화 지역들과 도시 열현상의 관계성으로 설정하였다. 연구목적은 시가화 지역 Entropy와 열 현상과의 관계성을 국내 5개 주요 도시 사례를 통해 살펴보는 것이다. 연구대상지 토지피복 자료 촬영시기와 동일한 해인 2018년 7월 여름 기상자료를 바탕으로 InVEST Urban Cooling Model을 이용하였고, MSPA(Morphological Spatial Pattern Analysis) 모형을 이용하여 Entropy를 계산하였다. 주요결과로 첫째, Entropy와 Cooling Capacity Index(CCI) 순위 상관성은 낮은 순위 상관성을 보이고 있다($\rho=-0.3$). 둘째, Entropy와 Average temperature($^{\circ}\text{C}$) 사이에는 매우 높은 수준의 순위 상관성이 관찰된다($\rho=0.9$). 연구함의는 첫째, 난개발 정도가 큰 도시는 도시 열 현상에 부정적일 수 있다는 점이다. 둘째, 오픈스페이스의 성격을 갖는 비 시가화 지역의 분산·집중 등의 토지이용 공간 구성이 도시 열환경에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 본 연구는 일부 사례지역에 한정되어 진행되었다는 점에서 시가화 지역 Entropy와 열 현상 사이에서 일반화가 아닌 가능성이 관찰되고 있음으로 이해하는 것이 적절하다.

주제어 계획, 공간분석, 도시 열현상, 엔트로피, InVEST

Abstract: The issue to be discussed is set as the relationship between urban fragmentation and urban heat phenomena. The fragmentation is recognized as a negative form that commonly occurs in the process of urbanization. The purpose of this study is to examine the relationship between urbanization entropy and heat phenomenon by looking at the five major cities in Korea. The employed methods are InVEST Urban Cooling Model and MSPA (Morphological Spatial Pattern Analysis) by using the meteorological data for the July 2018. The major results are as follows; First, a low rank correlation($\rho=-0.3$) is found in the relation between entropy and *Cooling Capacity Index (CCI)*. Second, a very high level of rank correlation is observed between entropy and *Average Temperature($^{\circ}\text{C}$)*($\rho=0.9$). The implications are that 1) a city with a large degree of sprawling development can have a negative effect on urban heat phenomena; 2) the composition of land use including dispersion and concentration in non-urbanized areas, which has the characteristics of open space, can affect the urban thermal environment. Due to the limited

* 이 논문은 2023년도 국립 강릉원주대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었음

** 국립 강릉원주대학교 도시계획·부동산학과 교수(주저자: skang8@gwnu.ac.kr)

number of case studies, it is appropriate to understand that a possibility, not generalization, is observed between entropy and heat phenomena in urbanized areas.

Key Words: Planning, Spatial Analysis, Urban Heat Phenomenon, Entropy, InVEST

1. 서론

물리적 실재를 보다 온전하고 폭넓게 이해하고 경험하기 위해서는 Complementarity principle(상보성 원리)에 대한 인식이 중요하다. Wilczek(2021)은 Complementarity principle은 현상을 이해하고 경험을 대하는 하나의 태도로서, 어떤 물리적 대상이나 현상에 대한 근본적 이해는 이러한 이중성을 담고 있기에, 이에 대한 인식을 바탕으로 한 관찰과 이해가 필요하다고 주장한다. Complementarity principle은 Bohr가 1928년 제안한 개념으로, 입자 또는 시스템의 특정 속성을 동시에 정확하게 관찰하거나 측정할 수 없다는 의미로 입자의 위치를 확정하면 운동량이 불확정해지고 운동량을 확정하면 위치가 불확정하게 되는 Heigenberg의 Uncertainty principle(불확정성 원리)을 설명하기 위해 도입한 개념이다.

본 논문에서는 기존의 Complementarity 논의를 도시 및 지역사회에서 관찰되는 다양한 사회·물리적 현상들은 한 가지 관점으로 이해해서는 불완전하고, 다양한 또는 서로 다른 관점에서 관찰될 때 아주 다르거나 모순적인 성질로 이해될 수도 있다는 개념으로 확장하여 도시 계획 분야 논의에서 적용하고 시도해보고자 한다. 본 연구에서 다루게 될 도시계획 이슈는 도시화 과정에서 흔히 부정적인 스프롤 현상의 물리적 형태 중 하나로 인식되는 도시 파편화 지역들과 도시 열현상의 관계성으로 설정하였다.

도시 열섬현상은 도심에서 발생하는 대기 열의 흡수와 배출 사이의 균형의 문제로 이해할 수 있다(Montavez et al., 2000). 도시열섬현상은 도시 지역이 인근 농촌 지역보다 눈에 띄게 더워지는 현상이다(Li et al., 2016). 도심이 위치한 지역의 고유한 기후특성과, 그 지역의 바람이나 구름 두께 등은 초기의 태양 복사

량을 변화시켜 도시열섬의 강도를 결정하게 되는 주요 요인들이지만, 그에 더해 도심 내 토지이용과 구조물의 물리적 특성은 도시의 열현상을 더욱 왜곡시키는 요인이 된다. 도심 내 건축물의 규모와 차량 및 보행자를 위한 포장면의 규모는 해당지역의 태양복사 노출량 증감과 도시공간내에서의 열 에너지 흡수량에 영향을 미치는 요인이 되기도 한다(Bakarman et al., 2015; Priyadarsini et al., 2008).

도시의 불투수면 증가와 더불어 대기오염이나 교통량 증가도 도시 열섬현상에 부정적 영향을 미치는 요인이다(Niu et al., 2021; Taha, 1997; Yang et al., 2019). 안재현(2007)은 서울의 기상관측 분석을 통해 도시화에 따라 일조시간과 잠재 증발량이 감소하고 이에 따라 큰 폭의 강수량 증가가 관찰된다고 주장하였다. 명수정(2009)은 지역 내 하천이나 녹지에서 도시화 지역으로 가까이 갈수록 높은 온도상승 경향이 있음을 보여주었다. 기경석·이경재(2009)는 대규모 택지개발로 인한 도시의 대기의 온도변화를 분석하였는데 녹지율이 10% 증가할 때마다 0.430℃정도 온도 저감이 발생하는 것으로 분석하였다. 홍석환·이경재(2004)의 공동주택단지의 내부녹지가 대기온도에 미치는 영향을 분석하여 투수포장지역은 녹지와 함께 대기온도 저감에 효과적인 요소라는 것을 보여주었다.

도시의 열환경 변화는 여러 동식물 종의 서식지 조건에 영향을 미치며 결과적으로 종의 수명 주기와 분포에 영향을 미칠 수 있다. Melass(2016)는 보스턴 대도시 지역을 대상으로 대기의 온도가 7℃ 상승할 때, 봄 초부터 가을 말까지 식물의 생육 기간이 약 18~20일 증가 하였음을 보여주고 있다. 더운 날씨나 과열된 대기 온도는 유기체의 신진대사를 자극하여 에너지 소비를 증가시킬 수 있다(Ackley, 2015). 기후 변화가 도시지역에 거주하는 사람들에게 영향을 미친다는 사실

은 이미 여러 문헌에서 논의되고 있는데, Huang et al. (2020)은 열 노출이 질병 또는 사망률과 관련이 있을 수 있다고 주장한다.

저밀도 개발과는 구별되는 Fragmentation(파편화)이란 일반적으로 스프롤이 진행되는 도시지역이나 대도시권 일대에서 일정 단위 규모의 토지 또는 커뮤니티가 상호 단절, 고립 또는 단절성 되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다(강상준, 2022; Angel et al., 2010; Inostroza et al., 2013). Fragmentation(파편화) 개념은 경관생태와 도시계획분야에서 많이 사용된다(Angel et al., 2010; Schneider and Woodcock, 2008; Schwarz, 2010). Fragmentation(파편화)은 도시확장과정에서의 형태학적 또는 공간적 효율성을 의미하는데 일반적으로 Morphological characteristics로 측정된다(Batty et al., 2003; Schwarz, 2010). Fragmentation(파편화)은 전 세계적으로 많은 도시에서 관찰되는 현상으로 논의되고 있다. Angel et al. (2010)에 따르면 1990년과 2000년에 120개 도시의 글로벌 샘플에 대한 위성 이미지와 인구 조사 데이터를 사용한 분석결과 현재 많은 도시들이 건물 면적과 평균적으로 유사한 정도로 많은 오픈스페이스를 포함하며 공간적 단절성을 보이고 있음이 나타났다. Fragmentation(파편화)은 그 의미상 파편화 이상의 의미를 담고 있어 용어 정의의 관점에서 더 많은 논의가 필요하다. 따라서 현시점에서는 스프롤과 같이 영문 그대로 사용하는 것이 더 적절할 것이다.

연구목적은 시가화 지역 Entropy와 열 현상과의 관계성을 국내 5개 주요 도시 사례를 통해 살펴보는 것이다. 본 연구를 통해 도시의 열현상을 Entropy 관점에서 해석해보고자 한다. Entropy는 열역학적 정의와 통계학적인 정의 두 가지 서로 다른 관점에서 정의가 가능하다. 열역학적 정의에 따르면 Entropy는 system 내에서의 무질서도 또는 불확실성을 의미한다. 반면, 통계학적 정의에 따르면 Entropy 개념은 모든 System에서 적용할 수 있으며 공간기하학 관점에서 공간적 파편화 크기를 이해하기 위한 지표로 응용되었다(강상준, 2022; Vogt, 2010). 본 연구에서 논의하는 Entropy는 통계학적인 개념을 따르는 것으로 정

의하였다.

기본 물리학 법칙에 따르면 Closed system에서는 Entropy가 점차 증가한다. System은 연구 분야에 따라 다르게 정의될 수 있지만, 여기서 언급되는 System이란 통합된 전체를 형성하기 위해 각각의 경계, 구조, 목적, 기능에 따라 내부적으로 일련의 규칙에 따라 작용하며, 외부적으로는 둘러싸인 환경과 서로 다른 정도로 상호 영향을 주고받는 상태로 정의된다. 모든 시스템은 인과적 경계가 있고, 맥락의 영향을 받으며, 구조와 기능, 그리고 역할과 관계로 정의되며 크게 Isolated, Closed, Open(Physical) system으로 구분된다. Isolated system은 주위와 물질이나 에너지 교환이 가능하지 않은 시스템이다. Closed system은 주위와 에너지 교환은 가능하나 물질 교환은 불가능하며, 자연과학에서 외부와 물질 소통이 발생하지 않는 물리적 계를 일컫는 용어로 볼 수 있다. 에너지 흐름이 질서에서 무질서로 변환한다는 Entropy 개념을 포함하며 Open system과 반대 개념이나 Isolated system과 달리 에너지는 소통할 수 있다. 마지막으로 Open system은 physical system으로도 지칭되며 System 외부 환경에 있는 물질이나 에너지를 교환할 수 있는 System을 의미한다. 도시화 현상이 엄밀한 의미에서 닫힌계인지 열린계인지는 도시화 과정에서 발생하게 되는 에너지와 물질의 정의 등 맥락에 따라 다르게 정의될 수 있을 것이다. 하지만 도시는 에너지와 물질의 순환이 내외부 상호 간 활발히 발생한다는 점을 고려하면 Open system 속성이 큰 것으로 이해하는 것이 보편적일 것이다.

2. 연구방법론

1) InVEST Urban Cooling Model

InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)는 미국의 Natural Capital Project 연구사업으로 Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences,

the Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences 기관들의 공동연구로 개발되어 운영되고 있는 연구분석모델이다. InVEST는 자연생태시스템이 제공하는 재화와 서비스를 정량화하고 그 정보가 갖는 가치평가를 수행할 수 있는 분석의 틀을 제공하는데 연구목적에 따라 여러 가지 독립 또는 연계모델을 제공한다(<https://naturalcapital-project.stanford.edu/who-we-are/natural-capital-project>). 본 연구에서는 도시지역 내 대기온도 추정과 열저감 능력 분석모델인 InVEST Urban Cooling Model을 사용하였다. 분석지표는 연구대상지의 냉각 용량지수(*Cooling capacity index, CCi*), 평균 온도(*Average temperature, °C*)로 설정하였다.

$$ETI = \frac{(Kc \cdot ET0)}{(ET_{max})}$$

$$CCi = 0.6 \cdot shade + 0.2 \cdot albedo + 0.2 \cdot ETI$$

*Cooling capacity index(CCi)*는 연구대상지의 *Shade*, *Evapotranspiration*, *Albedo* 변수값을 통해 픽셀 단위 입력값이 산출된다(Kunapo et al., 2018; Zardo et al., 2017). *Shade factor*는 InVEST 모델에 입력되는 토지이용 분류별 단위 면적당 높이 2m 이상 수목의 수관(Tree canopy)이 차지하는 비율을 나타내며 0에서 1의 값을 갖는다. *Albedo factor*는 토지이용 유형별 태양복사비율(0~1)을 의미한다(Phelan et al., 2015). *Evapotranspiration index(ETI)*는 정규화된 *Potential evapotranspiration* 값으로 각 픽셀별 식생, 토양, 인공포장된 지면으로부터의 증발산 값을 의미한다. *ET0*는 사용자 입력 *Reference evapotranspiration*, *Kc*는 토지이용분류별 *Crop coefficient*, *ETmax*는 연구대상지 내 *ET0* 래스터 최대값을 나타낸다. *CCi* 공식에서 각각의 요인별 가중치는 연구대상지내 *Shade*, *Albedo*, *ETI* 상호간 비율에 대한 측정값이 없기에 각각 0.6, 0.2, 0.2를 적용하였다(Phelan et al., 2015). 이 경우 연구대상지 실측값 또는 모델 민감도 테스트 목적으로 별도의 값을 입력할 수도 있다. InVEST Urban Cooling Model

은 대상지의 평균온도를 계산하기 위해서 해당지역의 *Urban Heat Index(UHI) magnitude*와 *Urban Heat Index Maximum(UHI_{max})*을 이용하는데, 이 자료는 Annual, Seasonal, Daytime, Nighttime 기준별로 수집이 가능하다. 해당자료는 Global Surface UHI Explorer(<https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap>)에서 조회 후 정보수집할 수 있다. 일반적인 대기혼합현상을 모의하기 위해 대상지 내에서 연산되는 각 픽셀별 온도 값들은 인접한 주변의 픽셀공간들로 확산되어 가는 방식으로 누적·연산된다. 이때 InVEST Urban Cooling 모형은 Gaussian function with kernel radius를 바탕으로 *Tair_{nomix}*로부터 *Actual air temperature with air mixing(Tair)*를 산출한다.

$$Tair_{nomix,i} = Tair_{ref} + (1 - HMi) \cdot UHI_{max}$$

*Tair_{ref}*는 해당 지역의 *rural reference temperature*를 나타내며 Urban Heat Mitigation Index(HMi)는 면적 규모 20,000m²(2ha) 이상의 산림지역이 연구지역에 주는 냉각효과를 의미한다(McDonald et al., 2016; Zardo et al., 2017). 연구지역 내에 큰 규모의 산림이 입지하고 있지 않으면 *HMi*는 *CCi*와 같은 값을 가지게 되며, 만일 입지한다면 연구대상지 모든 픽셀이 갖는 *CCi*값은 그 대규모 산림에서 거리 반비례 가중치 평균값의 영향을 받게 된다. *UHI_{max}*는 대상지 UHI 효과의 최대강도 값을 의미하며 이는 해당 지역에서 관찰되는 *maximum temperature*와 *Tair_{ref}* 값의 차이로 얻어진다. InVEST model은 Urban fabric이 도시 열현상에 미치는 관계성 이해를 위한 이론모형으로, 계산된 온도 값은 대상지 실측값과 차이를 갖는다.

2) Entropy

Entropy 공식은 정보이론(Information theory)의 전통적인 Entropy 정의를 바탕으로, 공간분석을 하기 위한 목적으로 수정·고안되었다(Vogt, 2010). 입력되는 공간정보에서 분석하고자 하는 특정 토지이용의 공간구성(spatial composition)·배열(arrangement)

을 살펴볼 수 있다. Entropy(라틴 대문자 S) 분석법은 Shannon's Entropy 개념을 응용한 개념으로 연구 대상지 공간 안에서 특정한 공간정보의 분산이나 집중의 수준을 측정할 수 있는 지표 또는 지수이다(Das Chatterjee et al., 2016; Sudhira et al., 2004; Yeh and Li 1998).

Entropy 계산은 입력되는 분석 대상 래스터 이미지에서 하나의 픽셀과 그를 둘러싼 8개 픽셀(8-connectivity)이 분석의 최소 공간 단위로, 입력되는 래스터 파일의 중앙에서부터 시작해서 점차 외부로 이어가며 연산이 이루어진다. 최소 공간 단위 Entropy는 Fragmentation entropy, 입력되는 공간자료 전체 지역의 Entropy는 Spatial entropy로 연구대상지 전체의 Entropy 값으로 정의된다. 공식은 아래와 같다.

$$FRAG_{entropy} = -\sum P_i * \log_2(P_i)$$

P_i 는 입력한 이미지 자료에서 상호 인접한 두 개의 픽셀 사이에서 차이(i)가 발생할 확률을 나타낸다. FRAGentropy 결과는 0에서 100% 사이의 값으로 산출된다. 본 연구의 입력자료인 토지피복도 시가화 지역 집중·분산도의 경우, 0에 가까운 값(Min. Entropy)은 시가화 지역이라는 공간정보의 집중도가 크다는 것으로 토지피복유형 중 Developed area(시가화 지역)가 높은 확률로 인접·군집하여 입지·위치하고 있음을 의미한다. 반면 Entropy 값이 크다(Max. Entropy)는 공간집중도가 낮다는 것으로 Developed area(시가화 지역)가 Non-developed area(비시가화 지역)들과 매우 높은 확률로 섞여서 혼합·입지하고 있음을 의미한다.

3) 분석 프로세스 및 입력자료

연구대상은 수도권 대도시권을 제외한 국내 도시화 지역의 일반적 특성을 보이는 광역시 중 지역별 분포를 고려하여 부산, 광주, 대구, 울산, 대전 5개 지역을 사례지역으로 선정하여 진행하였다. 연구는 다음의 과정으로 진행된다.

첫째, 연구대상지 5개 광역시의 최근의 토지피복자

료 촬영시기와 동일한 해인 2018년 7월 여름 기상자료를 바탕으로 InVEST model을 이용하여 해당 지역의 Cooling capacity index(CCi)와 Average temperature(°C)를 도출한다. 둘째, 연구대상지 각각의 시가화 지역의 Entropy 값을 산출한다. Entropy 분석은 Morphological Spatial Pattern Analysis(MSPA) 모형을 이용하였다. MSPA 분석에 대한 보다 많은 논의는 강상준(2022; 2021)에서 찾아볼 수 있다. 셋째, Spearman rank correlation analysis(ρ)를 이용하여 (1) Entropy와 CCi 사이의 순위 상관성, (2) Entropy와 Average temperature 사이의 순위 상관성을 살펴 보았다.

InVEST에 사용한 토지피복은 2010년대 말 30미터 급 대분류로 시가화, 농업, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역으로 구분된다(<https://egis.me.go.kr/intro/land.do>). 해당 자료는 2018년 촬영되어 2019년 제작되었다. 현재 환경부 환경공간정보서비스에서는 2022년 세분류 토지피복도 제공하고 있으나, InVEST model의 필수 변수값이 대분류 해상도로 모니터링되어 제공되고 있어 세분류 대신 대분류 자료를 사용하였다. 공간적 범위를 한정하는 행정경계는 통계지리정보서비스 공개자료를 이용하였다(<https://sgis.kostat.go.kr/view/index>).

InVEST 모형의 필수 입력자료는 Biophysical table, 입력변수, 공간자료 세 가지 유형으로 Biophysical table은 각 토지이용 분류유형별 shade, Kc, Albedo, Green area relation, Building intensity 값을 가지

〈표 1〉 Biophysical table 입력변수(Shade, Kc, Albedo)

토지이용	Shade	Kc	Albedo
기타용도	0	0	0
시가화	0.05	0.37	0.18
농업	1	0.7	0.2
산림	1	1	0.15
초지	1	1	0.2
습지	1	1	0.11
나지	0	0.3	0.2
수역	1	1	0.06

고 있다(표 1, 2, 3). 공간자료는 Evapotranspiration raster, Area of Interest shp, Land use scenario raster이며 InVEST 모델에서 입력된 공간 및 속성자료는 Biophysical table 토지이용 분류유형에 따라 조정하였다.

〈표 2〉 Biophysical table 입력변수
(Green area, Building intensity)

토지이용	Green area	Building intensity
기타용도	0	0
시가화	0	0.7
농업	1	0
산림	1	0
초지	1	0
습지	1	0
나지	0	0
수역	1	0

〈표 3〉 주요 입력변수와 입력값

주요 입력변수	변수입력값
Maxi. cooling distance	InVEST 권장 변수값: 450m
Reference air temperature	연구대상 지역별 2018년 7월 일평균기온으로 울산(26.8℃), 부산(26.7℃), 대구(28.2℃), 대전(27.9℃), 광주(28.3℃). 자료출처: 기상청기상자료포털(https://data.kma.go.kr/climate/RankState/selectRankStatisticsDivisionList.do)
UHI effect	연구대상 지역별 2018년 7월 여름 도심 최고 온도와 교외 온도의 차이로 도시열섬효과의 크기를 의미(울산 3.01℃, 부산 2.22℃, 대구 4.29℃, 대전 4.14℃, 광주 4.46℃: https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap)
Air blending distance	InVEST 권장 변수값: 500~600m
Area of interest	연구대상지 공간적 경계
Land use	토지이용 시나리오
Map of evapotranspiration	2018년 7월 Monthly Actual ET 지도로 USGS Earth Resources Observation & Science Center에서 제작됨(https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/460).

3. 결과

먼저 InVEST model analysis를 통해 지역별 Cooling capacity index(CCi)와 Average temperature(℃)를 산출하였다(표 4, 5) 〈그림 1, 2〉. 다음으로 MSPA 분석을 통해 지역별 Entropy 값이 도출되었다. Entropy가 0에 가까운 지역(Min, entropy)이란 그 지역이 대부분 시가화 지역만으로 이루어져 있음을 의미한다. Entropy 값이 크다(Max, entropy)는 것은 그 지역 대부분이 시가화와 비시가화 지역으로 많이 섞여 있는 Fragmentation sprwal(파편화 스프롤)의 형태학적 특성을 보이는 지역을 의미한다.

〈표 4〉 연구대상지별 주요 결과(Developed area, Entropy)

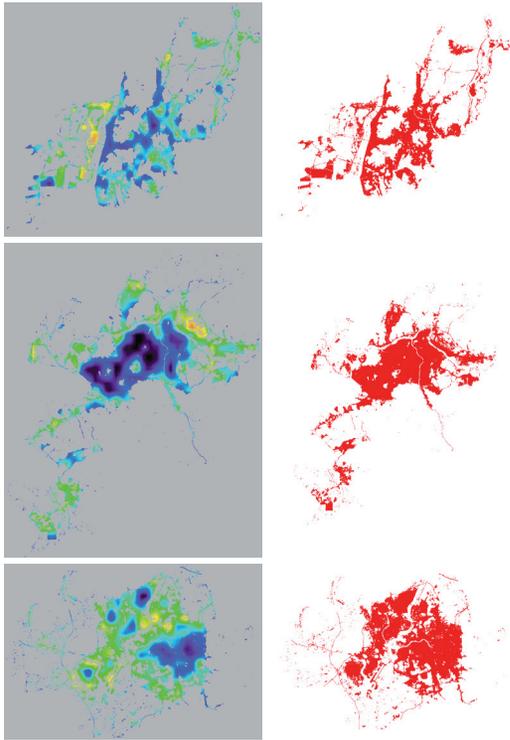
지역	Developed(%)	Entropy(%)
부산	30.01/	11.16
대구	22.11	11.32
광주	27.40	18.27
대전	22.01	13.86
울산	14.50	10.86

〈표 5〉 연구대상지별 주요 결과(CC index, Ave.temp.)

지역	CC Index	Ave.temp.(℃)
부산	0.51	27.52
대구	0.59	29.39
광주	0.55	29.74
대전	0.61	29.06
울산	0.62	27.38

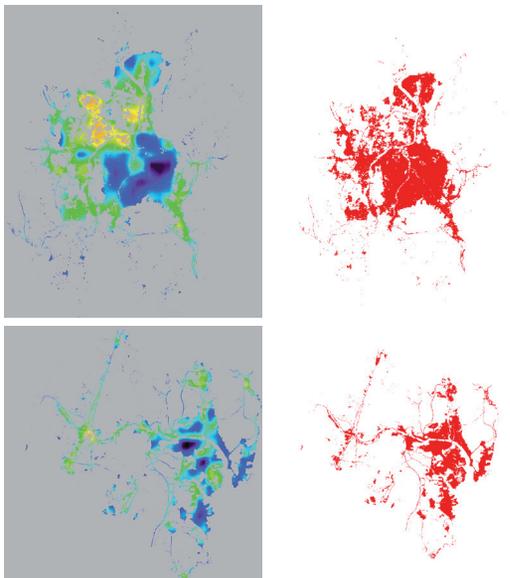
연구대상지별 시가화 지역 비율은 부산이 30.01%로 가장 높으며, 울산이 14.50%로 가장 낮은 것으로 나타난다. 반면 시가화 지역의 분산·집중도는 각 도시에서 시가화 지역이 차지하는 비율과 다른 순위를 보이는데, 시가화 지역의 분산도는 광주가 18.27%로 가장 높으며 울산이 10.86%로 가장 낮은 것으로 나타난다.

Cooling capacity index(CCi)는 울산이 0.62로 가장 높은 값을 보이며 부산이 0.51로 가장 낮은 수준의 지역 내 대기 냉각역량을 보인다. Average tempera-



〈그림 1〉 Entropy & Developed area
(위로부터 아래로 부산, 대구, 광주)

주: Entropy는 붉은색-노란색-초록색-파랑색-보라색 순으로 높은 값에서 낮은 값을 나타냄



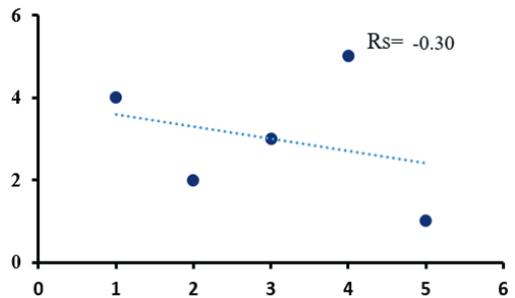
〈그림 2〉 Entropy & Developed area
(위로부터 아래로 대전, 울산)

주: Entropy는 붉은색-노란색-초록색-파랑색-보라색 순으로 높은 값에서 낮은 값을 나타냄

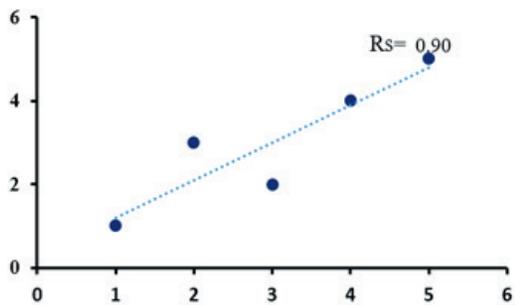
ture(℃)는 광주가 29.74℃로 가장 높은 평균온도를 보이며, 울산이 가장 낮은 27.38℃를 보인다.

주요 결과는 다음과 같다. 첫째, Entropy와 CCi 순위 상관성은 상호 음(-)의 순위 상관성을 보이고 있다. 하지만 두 변수사이의 상관성은 매우 낮은 것으로 나타나고 있다($\rho = -0.3$)〈그림 3〉. 둘째, Entropy와 Average temperature(℃) 사이에는 매우 높은 수준의 순위 상관성이 관찰된다($\rho = 0.9$)〈그림 4〉. 이는 시가화 지역의 분산도가 높은 지역, 즉, 시가화 지역들이 비시가화 지역들과 많이 섞여 있는 도시가 높은 정도의 Average temperature(℃)를 보인다는 것을 의미한다.

Spearman rank correlation(ρ) 순위 상관성 판단 기준은 ± 0.9 이상은 매우 높음, $\pm 0.7 \sim 0.9$ 는 높음, $\pm 0.5 \sim 0.7$ 은 보통, $\pm 0.3 \sim 0.5$ 는 낮은 것으로 기준 문헌의 기준을 준용하였다(Rovai et al., 2013). 본 연구에서 Developed land use area는 CCi와 Average temperature 산출의 직접적인 변수로 사용되므로 상호 관계성 논의는 하지 않았다.



〈그림 3〉 Spearman 상관관계(Entropy & CC Index)



〈그림 4〉 Spearman 상관관계(Entropy & Ave.temp)

4. 결론

연구대상지의 열 현상 분석지표로 설정된 냉각용량 지수(Cooling capacity index, CCI), 평균 온도값(Average temperature, $^{\circ}\text{C}$), 그리고 Entropy 사이의 순위 상관성 분석 결과는 일부 사례지역에 한정되어 진행되었다는 점에서 많은 사례연구를 통해 논의될 필요가 있다. 하지만 국내 주요 5개 도시사례를 통해 살펴본 결과 시가화 지역의 Entropy와 도시 열현상 사이에 일정 수준의 규칙성이 관찰되고 있다. Entropy와 Average temperature($^{\circ}\text{C}$) 두 변수 사이의 높은 순위 상관성($\rho=0.9$)을 바탕으로 논의할 수 있는 함의는 다음 두 가지이다.

첫째, 한 도시 내에서 시가화 지역의 분산도가 높거나, 시가화 지역들이 비시가화 지역들과 많이 섞여 있는 흔히 말하는 난개발 정도가 큰 도시는 도시 열 현상에 부정적일 수 있다는 점이다. 이는 시가화 지역들과 습지, 녹지, 초지 등 비 시가화 지역이 인접되어 혼합된 현상으로, Angel et al.(2010)이나 논문에서 논의하는 파편화 도시화 지역의 물리적 특성으로 스프롤의 한 유형으로 볼 수 있다. 위와 같은 도시화 형태는 선행연구(강상준, 2022; 2021)에서 언급하였던 시가화 용도지역 내 상호 군집성, 단절성, 또는 연결성과는 다른 도시 형태를 의미한다.

둘째, 도시 내 녹지, 초지, 습지, 수역 등 오픈스페이스의 성격을 갖는 비시가화 지역의 분산·집중 등의 토지이용 공간 구성이 도시 열환경에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 예컨대, 도시 폭염이나 열섬현상 개선에 긍정적 요인으로 논의되는 오픈스페이스도 도시 전 지역에 걸쳐 소규모로 파편화되어 자리잡는 것보다는 일부 지역에만 국한되어 입지하더라도 비교적 대규모 산림으로 조성하는 것이 도시 열섬 또는 폭염현상 개선에 긍정적일 수 있다는 것이다. 이는 선행연구(강상준, 2022)와 유사한 토지이용관점의 함의를 가지고 있다. 도시지역 내 생활 가까이 높은 접근성을 갖는 소규모 오픈스페이스는 다양한 효용성을 갖는 도시구성요소이다. 하지만, 폭염이나 열섬 등 대기 열현상 개선에는 기여도가 낮을 수 있어, 도심 내 오픈스페이스 구성

은 그 목적에 따라 다르게 구성되는 것이 바람직함을 의미한다.

본 연구가 갖는 계획적 함의로는 다양한 또는 다른 관점에서의 도시 현상 또는 계획 활동에 대한 해석을 요구하는 Complementarity 관점의 논의는 기존 계획 개념이나 성과에서 새로운 효용성 관찰의 기회를 제공한다는 것이다. 본 연구의 주요 분석 대상은 환경부 대분류 토지피복 유형 중 하나인 시가화(Developed)로 공간자료구축의 기술적 정의로 토지피복의 한 가지 상태를 의미한다. 시가화는 도시화(Urbanized)가 갖는 물리적 측면의 일부 특징을 의미하며 도시화와 같은 의미라고 보기는 어렵다. 하지만 본 연구에서는 시가화가 갖는 기술적 의미를 도시화 논의 맥락으로의 확장을 고려하여 시가화 Entropy를 도시화 Entropy로 기술하였다.

참고문헌

- 강상준, 2022, 교외개발의 재조명: 도시의 진화와 계획으로의 함의, 『환경영향평가』, 31(3), pp.161-172.
- 강상준, 2021, 시가화지역 공간상 위치분배와 폭염현상과의 관계성: 5개 광역시사례, 『환경영향평가』, 30(3), pp. 175-185.
- 기경석·이경재, 2009, 대도시 외곽지역 논경작지의 토지이용 및 피복변화에 따른 온도변화 모형 연구, 『한국조경학회지』, 37(1), pp.18-27.
- 명수정, 2009, 도시 토지이용변화에 따른 수문기상 변화 분석, 『한국환경정책평가연구원』.
- 안재현, 2006, 도시 토지이용변화에 따른 수문기상 변화 분석, 『한국수자원학회 학술발표회 논문집』.
- 홍석환·이경재, 2004, 서울 강남지역 아파트단지의 녹지면적에 따른 온도변화 모형, 『한국환경생태학회지』, 18(1), pp.53-60.
- Ackley J., Angilletta, M., J., DeNardo, D., Sullivan, B., and J. Wu, 2015, Urban heat island mitigation strategies and lizard thermal ecology: landscaping can quadruple potential activity time in an arid city. *Urban ecosystems*, 18, pp.1447-1459.
- Angel, S., Parent, J., and D. Civco, 2010, The fragmentation of urban footprints: Global evidence of

- urban sprawl 1990-2000. Lincoln Institute of Land Policy Working Paper. Cambridge, MA.
- Bakarman, M., and Chang, J., 2015, The influence of height/width ratio on urban heat island in hot-arid climates, *Procedia Engineering*, 118, pp.101-108.
- Batty, M., Steadman P., and Y. Xie, 2004, Visualisation in spatial modelling, *CASA Working Paper 79*. Centre for Advanced Spatial Analysis, University Collage London. London.
- Das Chatterjee N., Chatterjee S., and Khan A. 2016. Spatial modelling of urban sprawl around Greater Bhubaneswar city, India, *Modelling Earth System environmental biology*, 2(14).
- Huang, H., Deng, X., Yang H, and S. Li, 2020, Spatial evolution of the effects of urban heat island on residents' health. *Technical Gazette*, 27(5), pp.1427-1435.
- Kunapo, J., Fletcher, T., Ladson, A. Cunningham, L., and M. Burns, 2018, A spatially explicit framework for climate adaptation. *Urban Water Journal*, 15(2), pp.159-166.
- Li, Y., Feng, Q., De-Xuan, S., and Z. Ke-Jia, 2016, Research on urban heat-island effect, *Procedia Engineering*, 169, pp.11-18.
- Luis, I., Rolf., and C., Elmar, 2013, Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A dynamic quantification and characterization of spatial patterns, *Journal of Environmental Management*, 115, pp.87-97.
- McDonald, R. I., Kroeger, T., Boucher, T., Wang, L., and R., Salem, 2016, *Planting healthy air: A global analysis of the role of urban trees in addressing particulate matter pollution and extreme heat*. CAB International, pp.128-139.
- Melaas, E., Wang, J., Miller, D., and M. Friedl, 2016, Interactions between urban vegetation and surface urban heat islands: a case study in the Boston metropolitan region. *Environmental Research Letters*, 11(5), pp.054020.
- Montavez, J., Rodriguez A., and J. Jimenez, 2000, A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 20(8), pp.899-911.
- Niu, L., Zhang, Z., Peng, Z., Liang, Y., Liu, M., Jiang, Y., and R. Tang, 2021, Identifying surface urban heat island drivers and their spatial heterogeneity in China's 281 cities: An empirical study based on multiscale geographically weighted regression. *Remote Sensing*, 13(21), pp.4428.
- Phelan, P., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Iii, H. S., and R., Taylor, 2015, *Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies*. *Annual Review of Environment and Resources*, pp.285-309.
- Priyadarsini, R., Hien, W., and C. David, 2008, Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. *Solar energy*, 82(8), pp.727-745.
- Rovai, A., Jason, D. Baker, and K. Michael, 2013, *Social science research design and statistics: A practitioner's guide to research methods and IBM SPSS*. Watertree Press.
- Schneider, A., and Woodcock, C., 2008, Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. *Urban Studies*, pp.659-692.
- Schwarz, N., 2010, Urban form revisited-Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, 96, pp.29-47.
- Sudhira, H., Ramachandra, T. and K., Jagadish, 2004, Urban sprawl: metrics and modeling using GIS, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(1), pp.29-39.
- Taha, H., 1997, Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings*, 25(2), pp.99-103.
- Yang, C., Zhan, Q., Gao, S., and H. Liu, 2019, How do the multi-temporal centroid trajectories of urban heat island correspond to impervious

surface changes: a case study in Wuhan, China.
International Journal of Environmental Research
and Public Health, 16(20), pp.3865.

Yeh, A. and Li, X. 1998. Sustainable land development
model for rapid growth areas using GIS, Inter-
national Journal of Geographical Information
Science, 12(2), pp.169-189.

Vogt, P., 2010, User Guide of GUIDOS, Institute
for Environment and Sustainability European
Commission, Joint Research Centre.

Wilczek, F, 2021, Fundamentals: Ten keys to reality,
Penguin Press.

Zardo, L., Geneletti, D., Prez-soba, M., and M., Eupen,
2017, Estimating the cooling capacity of green
infrastructures to support urban planning.
Ecosystem Services, 26, pp.225-235.

계재신청 2023.07.06

심사일자 2023.08.19

계재확정 2023.08.19

주저자: 강상준, 교신저자: 강상준