

공간적 자기상관을 활용한 건물부문 온실가스 배출량의 공간적 분포특성과 변화에 관한 연구: 경기도 성남시를 중심으로

여관현

안양대학교 공공행정학과 부교수

Spatial distribution characteristics and changes of greenhouse gas emissions in the building sector using spatial autocorrelation: Focusing on Seongnam City, Gyeonggi Province

Yeo, Kwan Hyun

Associate Professor, Dept. of Public Administration, Anyang University, Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT

This study analyzes the changes in spatial patterns and spatial distribution characteristics of greenhouse gas emissions in the building sector in 2013 and 2023 and suggests implications. The data for this study were constructed by attribute joining individual public notice land prices and energy consumption data (electricity and gas) in the building sector with spatial attribute data. In addition, greenhouse gas emissions by plot for 2013 and 2023 were calculated. The LISA analysis using the local Moran index and hotspot analysis using Getis Ord's statistics were performed. Greenhouse gas emissions tended to cluster around Bundang-gu, a new city, and the amount of greenhouse gas emissions increased sharply in the old downtown area (Sangdaewon 1-dong, Sinchon-dong, and Bukjeong-dong) over the past 10 years. Hotspot analysis, similar to the LISA analysis, identified the old downtown area (Sangdaewon 1-dong, Sinchon-dong, and Bukjeong-dong) as a hotspot with high carbon emissions. Three hotspot areas (Yatap-dong, Sunae-dong, and Gumi-dong areas) were observed in 2013, while seven hotspot areas were noted in 2023, with the addition of Sangdaewon 1-dong, Sampyeong-dong, Baekhyeon-dong, and Jeongja-dong to the existing three.

Key words : Greenhouse Gas Emissions, Spatial Pattern Changes, Spatial Autocorrelation, Hot Spot Analysis, LISA Analysis

1. 서론

최근 지구온난화와 기후변화는 지속가능한 도시개발을 위한 중요한 키워드로 등장하고 있으며, 이에 따라 국제 사회는 기후변화와 지구온난화 등 도시문제 해결을 위해 1997년 교토의정서를 채택하게 되었다(Cho et al., 2022). 또한, 2015년에는 우리나라도 선진국과 개도국이 함께 참여하는 파리협정에 가입하여 2016년 11월에 비준하기에 이른다. 이후 2021년 10월에 2050 탄소중립 시나리오 부

문과 2030 국가 온실가스 감축 목표 등을 심의·의결하였다. 그로 인해 우리나라의 2030년 국가 온실가스 감축 목표(NDC) 계획이 2018년 대비 26.3%에서 40% 감축으로 상향조정 되었다(Shin and Choi, 2022). 또한, 2050년에는 2018년 대비 온실가스 배출량을 88.1% 감축하는 탄소중립(net-zero) 시나리오를 확정한 바 있다. 이러한 온실가스 감축 목표 이행을 위해서는 특히 건물부문 에너지사용량과 이를 기초로 한 온실가스 배출의 공간적 분포특성 파악이 중요하다.

한편, 2018년 건물부문의 온실가스 배출량인 52.1백만

†Corresponding author : motelkh@anyang.ac.kr (Anyang University, 22, Samdeok-ro, 37-gil, Manan-gu, Anyang-si, 14028, Korea. Tel. +82-31-467-0898)

ORCID 여관현 0000-0003-0748-0273

톤을 기준으로, 2050년까지 대략 45.9백만 톤의 온실가스 배출량을 감축해야 하는 실정인 것이다(Shin and Choi, 2022). 따라서 향후 건물부문의 온실가스 감축 목표 달성을 위한 국가의 이행을 위해서는 우선 기초자치단체별로 온실가스 배출량의 미시적인 공간분포 분석이 요구된다. 이를 바탕으로 온실가스 배출량이 공간적으로 집중된 지역을 중심으로 탄소 저감 대책의 마련이 필요할 것이다(Yeo and Yu, 2023). 이러한 온실가스 배출량 감축 정책 수립을 위해서는 건물부문 온실가스 배출량의 공간적 분포패턴의 분석이 요구된다. 특히, 그동안 지구온난화의 주요한 원인으로 제시되고 있으며, 온실가스 배출부문으로서 중요한 건물부문에서의 온실가스 감축 관리의 중요성이 증대되고 있는 건물부문에서의 온실가스 배출량에 대해서는 배출량과 공간분포 특성을 세밀히 측정하는 진단이 무엇보다 중요한 과제이다.

그러나 세밀한 온실가스 배출량 산정을 위한 공간자료 취득의 한계와 미시적 공간 단위에서의 온실가스 공간분포 분석 등이 미흡한 상황이다(Cho et al., 2022; Yu et al., 2019). 이에 본 연구에서는 경기도 성남시의 2013년과 2023년 건물부문 온실가스 배출량을 기준으로 온실가스 배출량의 공간 분포패턴이 군집되는 양상을 분석한다. 또한, 온실가스 배출량의 콜드스팟(Cold Spot) 및 핫스팟(Hot Spot) 분석을 통한 공간적 분포와 공간적 패턴 변화를 파악한다. 그리고 2013년부터 2023년까지 10년간 건물부문 온실가스 배출량의 차이가 큰 지역, 즉 온실가스 배출량의 큰 증가 또는 감소 지역을 공간적으로 분석하고 이를 구체적으로 시각화하여 공간적인 분포특성을 제시한다.

2. 선행연구 검토

최근까지 진행된 건물부문 온실가스 배출량의 분포패턴 관련 연구는 크게 온실가스 배출량에 대한 현황 및 특성분석(Giest, 2017; Jeong, Mun et al., 2021; Yeo and Yu, 2023; Yu et al., 2019)과 건축물 용도에 따른 온실가스 배출량의 특성(Choi, 2018; Gang et al., 2020; Shin and Choi, 2022; Yang et al., 2020; Yeo, 2024) 등으로 구분된다. 우선, 온실가스 배출량에 대한 현황 및 특성분석 연구로써, Giest (2017)는 코펜하겐을 포함한 유럽 도시를 대상으로 선정하여 스마트시티 개념을 도입한 각 지방정부의 다양한 스마트시티 솔루션에 관한 개발기법 및 데이터 관리에 대한 시사점을 제시한다.

Yu et al. (2019)는 서울시를 대상으로 2015년부터 2017년까지 건물부문 에너지사용량을 측정하고 이를 기반으로 온실가스 배출량에 관한 공간적인 분포패턴을 분석한다. 이 연구는 2015년과 2017년에 배출된 서울시 온실가스에 대한 분석을 건물부문으로 한정된 부분과 온실가스 배출량에 영향을 미치는 요인변수를 반영하지는 못한 것으로 평가된다. Jeong, Mun et al. (2021)는 건설산업 부문에서 발생하는 온실가스 배출량을 분석하고 연도별 온실가스 배출량의 변화와 건설산업 활동에서 발생하는 건설수주액 대비 온실가스 배출 원단위 특성을 제시하게 된다. 하지만 이 연구는 건설업 업종별 활동 데이터 및 온실가스 배출원 자료수집의 한계로 건설산업의 온실가스 배출원을 고려한 온실가스 배출 특성을 제시하지는 못하고 있다. Yeo and Yu (2023)는 경기도 수원시를 대상으로 2012년부터 2021년까지의 건물부문 온실가스 배출량에 대한 공간적 분포를 분석하고, 탄소중립을 정책 방향을 제시한다.

한편, 건축물 용도에 따른 온실가스 배출량의 특성에 관한 연구로써, Choi (2018)는 경상남도 지역을 사례로 선정하여 건물 에너지 및 온실가스 배출량을 파악하여 건물 층수별, 건축 용도별, 면적별로 각각 구분하여 특성을 분석하고 있으며, Gang et al. (2020)는 2018년 기준으로 주거용 건축물의 에너지사용량을 측정하여 주거용 건축물의 용도별 및 지역별 에너지사용량과 원단위의 특성 등을 분석한다. Yang et al. (2020)은 다지역산업연관모형(MRIO)을 활용하여 중국의 제조업 생산공간 운영지역에 대한 탄소 배출량을 제시한다. Shin and Choi (2022)는 그린투게더 데이터의 에너지사용량을 분석함으로써 2018년부터 2021년까지의 비주거용과 주거용 건축물의 온실가스 배출량 특성을 용도별로 제시한다. 또한, Yeo (2024)는 안양시를 대상으로 토지 용도별 탄소 배출량의 공간적 분포도를 측정하고 이를 바탕으로 정책적 함의를 도출한다. 하지만 도시의 건물부문 에너지사용량과 온실가스 배출량의 공간분석 및 지방정부 차원의 과제발굴 제안 등 측면에서는 미흡하게 평가된다.

이상의 선행연구 검토 결과, 건물의 단위에서 온실가스 배출량 및 에너지사용량을 산정하는 시스템 구축 및 새로운 기법개발 등의 방향으로 그동안 진행되었다. 하지만 지방정부 차원에서의 건축물 에너지와 온실가스 배출량 등을 각 필지 단위로 미시적으로 분석하여 온실가스 배출량의 공간분포 특성을 제시하는 미흡한 상황이다. 특히, 건물부문 온실가스 배출량의 공간분포를 분석하고, 지방

정부 차원의 탄소중립 정책 관련 연구는 현재까지 미미한 상황이다. 이러한 배경에서, 본 연구는 경기도 성남시를 대상으로 건물부문의 온실가스 배출량을 개별적인 필지의 미시적 수준에서 공간 데이터를 구축한다. 또한, 구축된 공간 데이터를 분석하여 온실가스 배출량의 공간적 분포특성과 시사점을 제시한다.

3. 연구설계

3.1. 연구절차 및 자료구축

본 연구에서의 분석수행 절차는 다음의 3단계로 구분되어 진다. 첫째, 성남시 건물부문 온실가스 배출량의 공간분포 패턴 분석에 활용될 공간자료를 구축하기 위하여 건축데이터 개방시스템(<http://open.eais.go.kr>)이 제공하는 2013년 및 2023년도 건물부문의 에너지 사용량(전기, 가스) 속성자료를 수집한다. 또한, 브이월드(<http://www.vworld.kr>)에서 제공하는 최신 자료인 2023년도 개별공시지가(Shape) 공간자료와 건물 에너지 사용량(전기, 가스) 속성 자료를 속성조인(attribute join)을 통해 GIS shape 공간자료를 구축한다. 둘째, 성남시 건물부문 온실가스 배출량을 분석하기 위해 IPCC (International Panel on Climate Change) 가이드라인을 활용한다(IPCC, 2006). 또한, 가스 사용량을 적용하기 위하여 IPCC 배출계수 또는 전력 사용량 계상 등은 2021년 승인된 연료연소 부문의 국가온실가스 배출계수를 적용하여 성남시 개별 필지별 온실가스(전기, 가스) 배출량을 산출한다(Jeong, Cho et al., 2021; Yeo and Yu, 2023; Yu et al., 2019). 셋째, 성남시 온실가스 배출량에 대한 공간적 특성을 살펴보고자 온실가스 배출량을 통한 공간적 자기상관 분석, 군집-특이(LISA) 분석, 핫스팟(Hot Spot) 분석을 시행한다. 마지막으로 공간분석 결과를 해석하여 성남시 공간분포 특성과 공간패턴 변화의 시사점을 제시한다.

본 연구의 수행을 위한 자료구축 절차는 다음과 같다. 먼저 성남시 건물부문 온실가스 배출량 산출을 위해 공간자료 및 속성자료를 기반으로 개별공시지가 공간자료와 에너지사용량 속성자료를 활용하여 공간분석 기초데이터를 구축한다. 여기서 건물부문 에너지사용량에 대한 공간자료 구축은 V-WORLD에서 제공하는 가장 최근 데이터인 2023년도 개별공시지가(SHP file format)를 사용한다. 또한, 민간개방시스템에서 공개하는 가장 최신 자료인 2023년도 건축물 에너지사용량(전기, 가스)에 대한 속성

Table 1. Building energy data properties in Seongnam city

Data name	File format	Data time	Data source	Management agency
Spatial data (lot)	SHP file	December 2013 and 2023	Digital twin territory (V-WORLD)	Ministry of land infrastructure and transport
Attribute data (building)	TXT file	Total from January to December 2013 and 2023	Private open building data system	Ministry of land infrastructure and transport

Source: Summarized by author with contents of building energy data

파일(TXT file format)에서 성남시 지역을 추출하여 공간 분석 자료로 활용한다(Table 1).

3.2. 분석방법

본 연구에서는 성남시 건물부문 온실가스의 분포특성 및 공간적 분포패턴의 변화 등을 파악하고자 전역적 모란지수를 적용한 공간적 자기상관을 분석한다. 또한, 국지적 모란지수를 적용한 LISA 분석을 비롯해 Getis Ord's G_i^* 통계값을 활용한 핫스팟 분석을 실시한다. 공간적 자기상관 분석의 장점은 특정 현상의 공간적 패턴 설명을 위해 공간적 배열이 우연적으로 형성되는지 아니면 그 배열이 특정한 질서를 형성하는지 분석한다(Choi, 2018; Park et al., 2021; Yeo and Yi, 2023). 공간적 자기상관은 어떤 한 지역의 특정변수관측치가 인접 지역의 동일변수 관측치와 상관성이 유의미함을 의미한다. 또한, 공간적 가중치 행렬의 산출 및 가중치를 통해 조정된 수치로 공간분석에 주로 활용된다(Hong, 2013).

본 연구는 공간적 자기상관 분석기법 중 가장 일반적인 기법으로 활용되고 있는 전역적 모란지수(global Moran's I)를 활용한다. 공간적 자기상관 분석은 온실가스 배출량이 특정한 공간에서 집적하는지 아니면 무작위적인지 등을 해석할 수 있다(Yi and Yeo, 2021). 따라서 성남시 건물부문 온실가스의 공간적인 분포패턴 분석을 위해 전역적 공간분석 기법인 전역적 모란지수의 통계량을 활용하였다. 전역적 모란지수는 공간상 특정한 현상의 분포패턴이 일정한 질서를 형성하는지 또는 무작위적인지 알려준

다. 또한, 분석대상지 공간상에서 지역적 분포패턴이 균집되거나 아니면 무작위적인지 등 분석에 유용하다(Yeo and Yu, 2023). 전역적 모란지수의 계산식은 다음의 Eq. (1)과 같다.

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j \omega_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_i \sum_j \omega_{ij} \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

where I = global Moran's I , N = the number of observation, X_i, X_j = the variable values at i and j , \bar{X} = the mean of variables, ω_{ij} = weight matrix between location i and j

전역적 모란지수는 단위 지역의 규모가 극히 넓거나 공간 구조가 안정적이지 못한 경우, 통계적인 추론 및 통계 모형의 유효성에서 오류를 초래할 수 있는 위험이 있다(Park et al., 2021). 따라서 국지적 수준의 공간적 자기상관성 분석기법으로서 LISA 분석이 일반적으로 제시되고 있다(Anselin, 1995). 여기서 LISA 분석은 국지적 모란지수를 활용함으로써 특정한 지역의 측정값이 인접 지역에서의 가중평균치와 비슷한 값으로 나타나면 정(+)의 공간적 자기상관으로 표현된다. 반면에 인접 지역의 가중평균치 값이 상반되거나 차이가 큰 경우에는 부(-)의 공간적 자기상관으로 제시된다. 균집-특이 분석을 위해서는 국지적 측면의 분석을 위한 Anselin Local Moran's I 분석 모형과 역거리(inverse distance) 행렬에 기반한 표준점수의 최대치를 계산하여 거리 임계치(threshold distance)를 설정하였다. 또한, 거리(distance)는 기하학적인(euclidean) 거리를 ROW 열을 표준화 값을 적용하였다. 이는 공간 가중 행렬을 횡단 표준화(row standardization)로 설정함으로써 균집-특이 특성분석이 가능하기 때문이다. 이러한 국지적 모란지수의 주요 계산식은 다음의 Eq. (2)와 같다. Eq. (2)에서 S_i^2 는 Eq. (3)의 식으로 계산된 것이다.

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

where I_i = local Moran's I , x_i = the variable value at i region, \bar{x} = the mean of variables, ω_{ij} = the spatial weight matrix between i and j

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3)$$

한편, LISA 분석은 국지적 모란지수를 적용함으로써 다음의 4가지 유형으로 표현된다(Choi et al., 2018). 유의 수준 0.05 수준에서 비슷한 z 값을 가지는 개체들의 균집은 HH(높은 값이 주변에 높은 값으로 둘러싸임)와 LL(낮은 값이 주변에 낮은 값으로 둘러싸임)과, 그 이외에 서로 다른 특성을 가진 개체들의 균집은 HL(높은 값이 주변에 낮은 값으로 둘러싸임)과 LH(낮은 값이 주변에 높은 값으로 둘러싸임) 등으로 표현된다. HL과 LH는 주변 지역과 다른 이례적인 특이(outlier) 현상을 보이는 지역이다. 그리고 성남시 건물부문 온실가스 분포특성을 시각적으로 가시화하기 위해 Getis Ord's G_i^* 통계값을 활용하여 핫스팟 분석을 실시한다. 여기서 G_i^* 통계량이 0에 가까우면 공간 단위 주변 지역에 비해 높거나 낮은 값이 집중되지 않는 것임을 의미한다(Yu et al., 2019).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n \omega_{ij})^2}{n-1}}} \quad (4)$$

where x_j : the variable values at j , \bar{x} : the mean of the variables, ω_{ij} : spatial weight matrix between location i and j , S : standard deviation, n : the number of observation

여기서는 핫스팟 분석 적용을 위한 거리 임계치를 적용하여 진행하였다. 이러한 방식의 핫스팟 분석으로 공간적 집적을 효과적으로 파악하는 것이 가능하다(Jeon et al., 2022; Jeong and Jun, 2013). 핫스팟 분석은 G_i^* 통계량 값이 양수이면 높은 속성값을 갖는 균집인 핫스팟으로 표현된다. 반면, G_i^* 통계량이 음수로 나타나면 낮은 속성값을 갖는 균집에 해당되는 콜드스팟을 형성하게 된다. 또한, 핫스팟 분석값이 통계적으로 유의미한지를 검증하기 위해서 Z 검정을 실행하였다. 이러한 과정을 통해 핫스팟 분석이 이루어지며, 점(point) 형태의 핫스팟 지역을 명확히 표현하고자 IDW(역거리 가중치법) 기법을 적용한 측정값을 공간적으로 표현하였다. 이러한 Getis Ord's G_i^* 통계값 산출식은 Eq. (4)와 같다.

4. 분석결과

4.1. 군집-특이(LISA) 분석

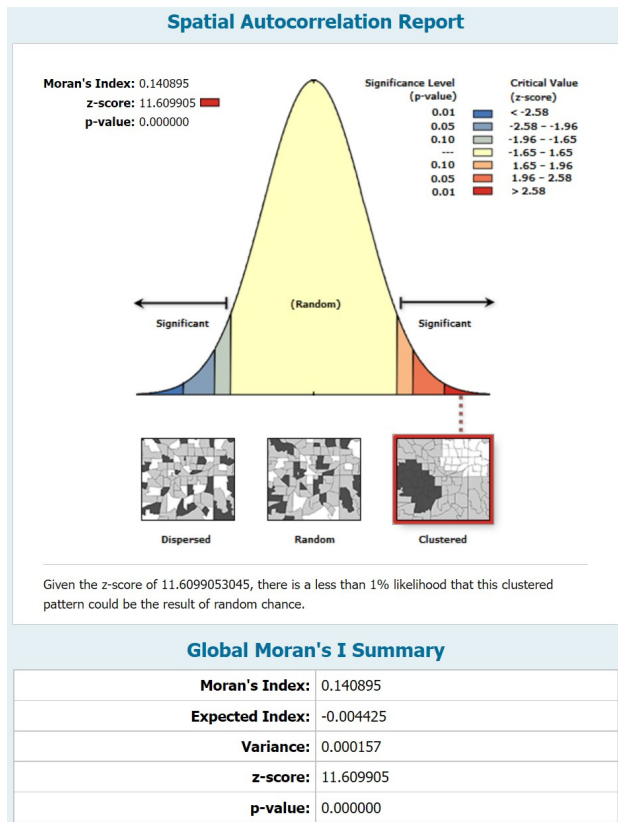
여기서는 성남시 건물부문 온실가스 배출량을 중심으로 2013년과 2023년도 온실가스 배출량의 공간적 자기상관 분석을 수행하였다. 전역적 모란지수 통계량 분석결과, 성남시 건물부문 온실가스 배출량의 데이터 분포는 2013년과 2023년 모두 정규분포를 형성하고 있다. 즉, 유의도 (p-value) 0.01 수준에서 Moran's I 통계량은 2013년 0.14와 2023년 0.10으로 각각 양의 공간적 분포패턴을 형성하였으며, Z-Score 값은 2013년 11.60과 2023년 8.68로서 매우 강한 집중(clustered)적 경향성을 나타내고 있다(Fig. 1 & Table 2).

여기서는 성남시 건물부문 온실가스 배출량의 공간적인 분포패턴 분석을 위해 2013년과 2023년의 성남시 건

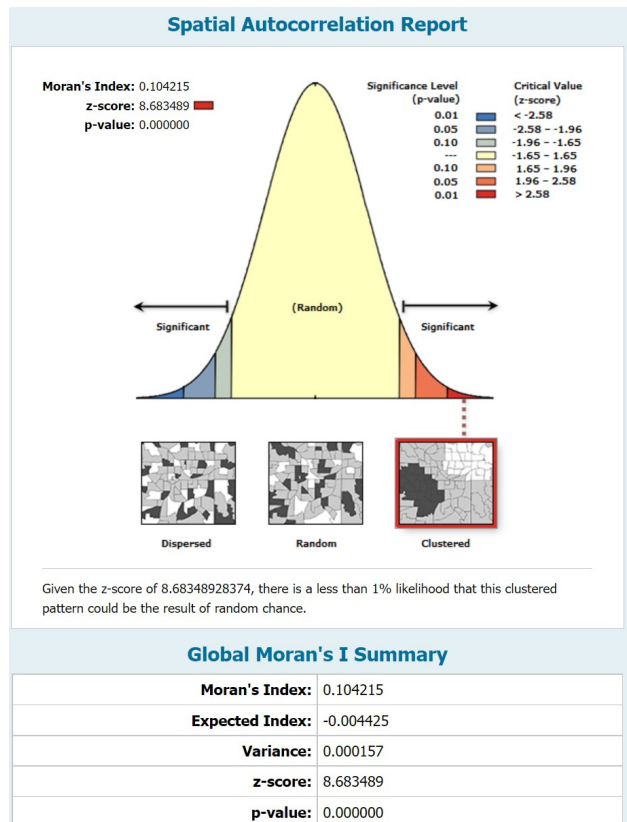
Table 2. Result of spatial autocorrelation analysis (2013 and 2023)

Year	Moran's I	Z-Score	P-Value
2013	0.14	11.60	0.00
2023	0.10	8.68	0.00

물부문 온실가스 배출량에 대한 공간 shape 데이터를 구축하고 군집-특이(LISA) 분석을 시행하였다. 성남시 온실가스 배출량에 따른 군집-특이(LISA) 분석결과, 2013년과 2023년의 HH 지역이 매우 비슷한 양상으로 군집을 형성하며, 분당구(야탑1동, 야탑2동, 삼평동, 이매1동, 이매2동, 백현동, 수내1동, 수내2동, 정자1동, 정자2동, 서편2동, 구미동, 구미1동), 중원구(상대원1동) 일대에서 온실가스 배출량이 높은 군집이 형성되고 있다(Fig. 2). 특히, 신시가지인 분당구(야탑동, 백현동, 이매동, 수내동, 정자동,



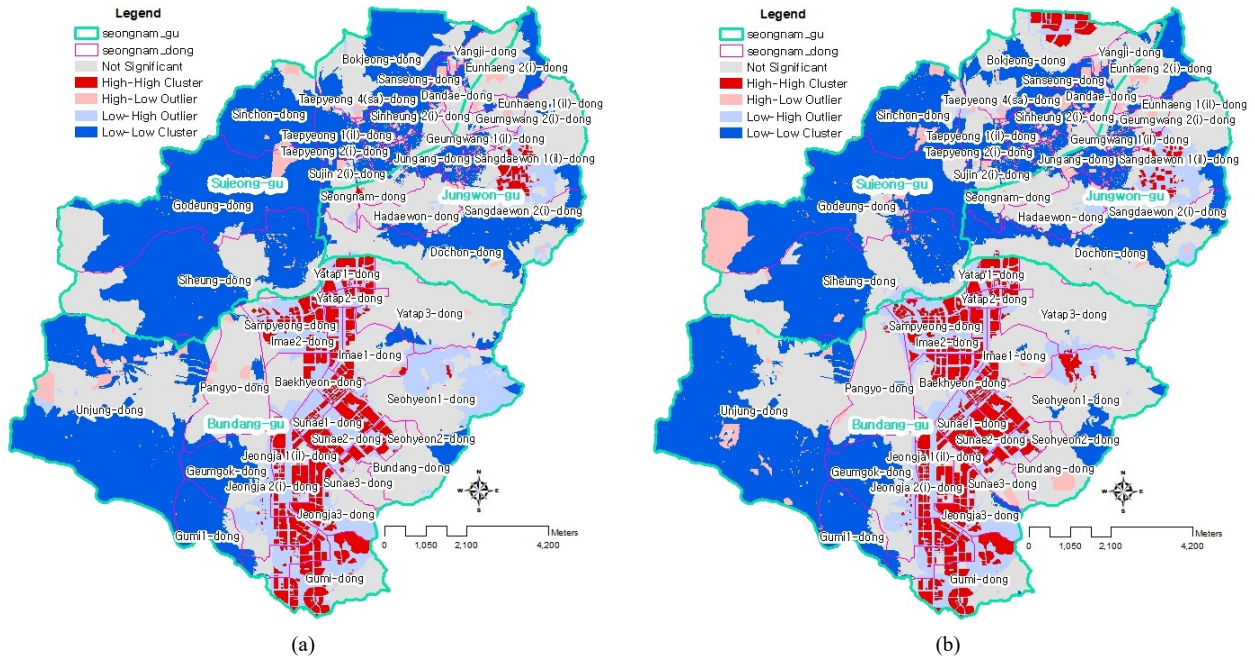
(a)



(b)

Source: Analyzed by author with provided by building energy data

Fig. 1. Result of spatial autocorrelation analysis; (a) 2013, (b) 2023



Source: Analyzed by author with provided by building energy data
 Fig. 2. Result of LISA analysis in Seongnam city; (a) 2013, (b) 2023

삼평동, 구미동)를 중심으로 강력하게 군집하는 경향으로 나타났다. 반면, 산지를 비롯한 넓은 녹지 공간 등 토지이용이 상대적으로 분포하는 수정구(시흥동, 고등동, 신촌동, 태평동, 북정동) 전역과 분당구(운중동) 일부 지역 등 성남시 서부와 북부의 전역에서는 2013년과 2023년 모두 온실가스 배출량이 낮은 LL 지역으로 드러났다. 또한, 주변 지역과 비교하여 특이한 값을 가지는 HL 및 LH 이상 지역은 HH와 LL 군집의 주변 지역을 중심으로 형성되면서 성남시 전역에 불규칙적으로 발견되었다. 이러한 분석 결과는 성남시의 행정동 별로 온실가스 배출량이 높은 것으로 형성되는 필지들이 주로 주거지역과 상업지역이 밀집하고 있는 판교 신도시를 비롯한 신시가진 분당구 지역에 집중적으로 군집하기 때문이다.

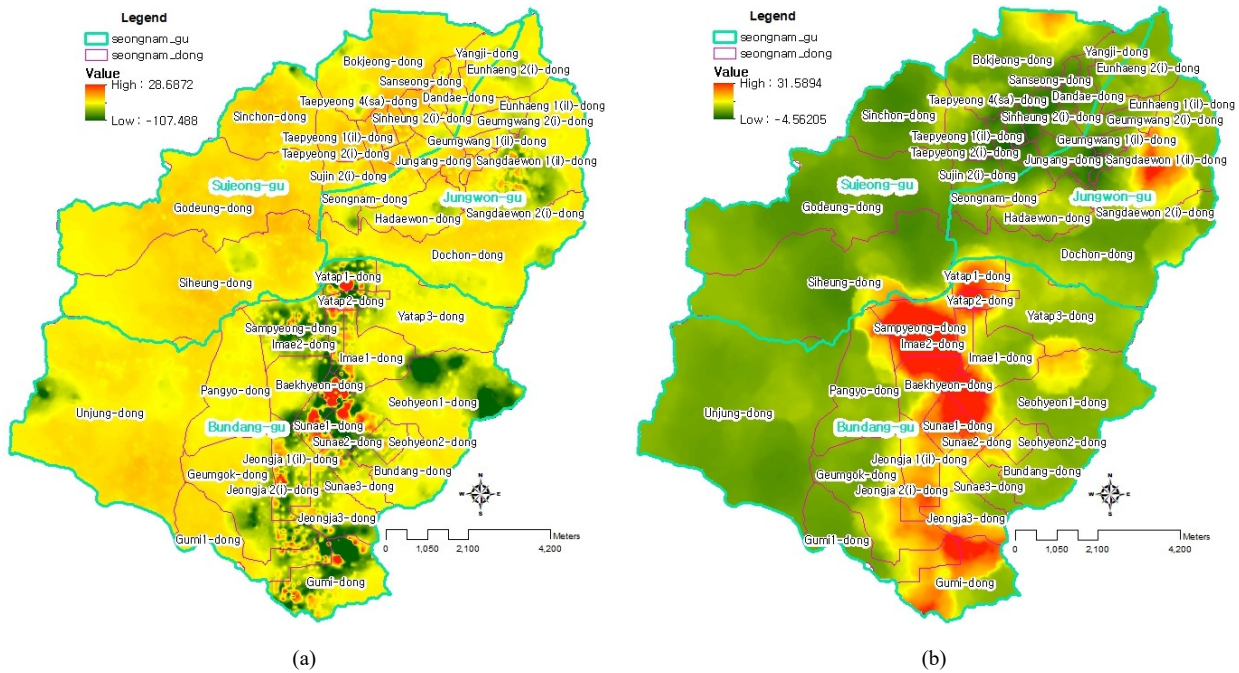
한편, 지난 10년간의 시계열별(2013년, 2023년) 변화를 살펴보면, 2013년 중원구 상대원1동 일대가 유일하게 HH 군집지역이 2023년에 축소되는 경향을 보였으며, 수정구 북정동과 분당구(서현1동, 백현동, 수내2동)의 경우 2023년에 새롭게 HH 군집이 형성 또는 확장되는 것으로 관찰되었다. 또한, 특이값을 의미하는 지역인 LH 이상 지역이 2013년과 2023년에서 모두 HH 군집지역 주변에서 대체로 발견되었으며, 중원구 상대원1동은 LH 지역이 확대되

었으나 분당구 서현1동은 축소되고 있다(Fig. 2). 이러한 원인으로는 중원구 상대원1동의 HH 군집지역 축소지역과 분당구 서현1동의 HH 군집이 확대되면서 주변 지역의 온실가스 배출량이 상대적으로 변화되었기 때문으로 추정된다. 또한, 분당구의 특정동(야탑1동, 야탑2동, 삼평동, 이매2동, 백현동, 수내1동, 수내2동, 정자1동, 정자2동, 구미동)의 필지에서 온실가스 배출량이 상대적으로 높게 해석된다. 왜냐하면 이러한 결과는 성남시 각 동별로 온실가스 배출량이 높은 필지들이 특정 지역(주로 주거지역과 상업지역이 집중적으로 밀집해 있는 도시지역 및 신시가진 등)에 군집한 결과이기 때문이다.

4.2. 핫스팟 분석

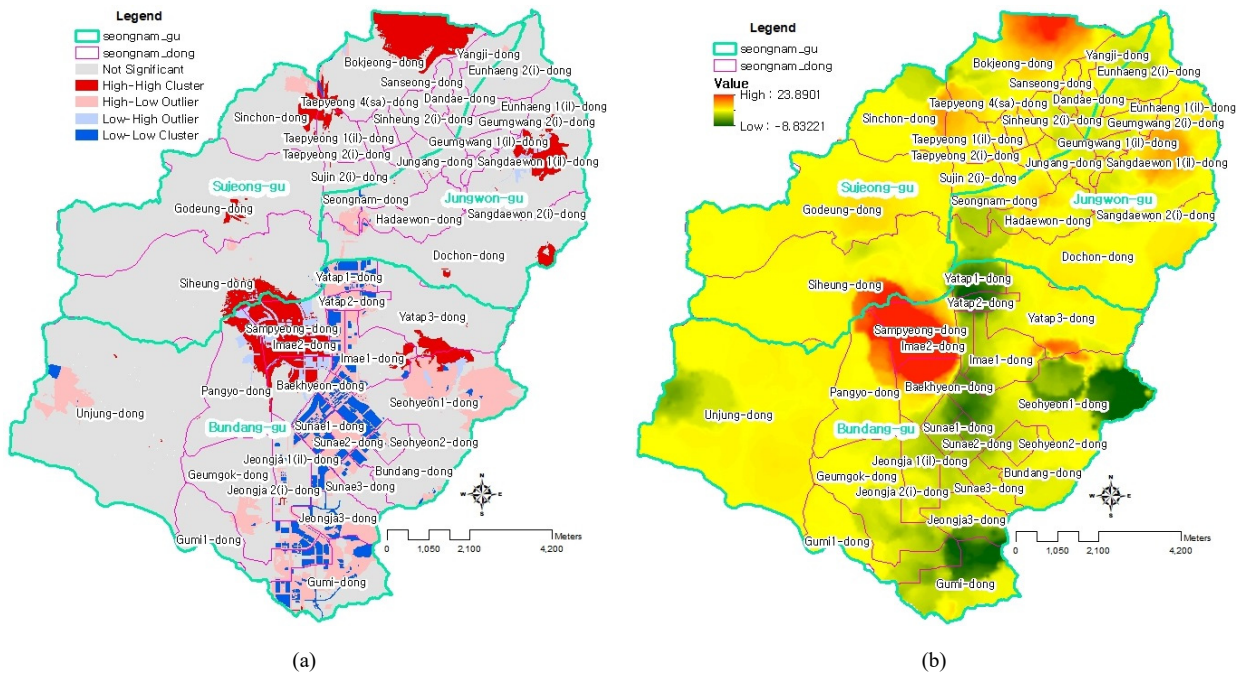
성남시 2013년과 2023년도 온실가스 배출량에 대한 공간적 군집 형상을 구별하고 해당 영역을 더욱 가시적으로 강조하여 표현하기 위해 Getis Ord's G_i^* 통계값을 적용한 핫스팟 분석을 시행하였다. 다음의 Fig. 3은 Getis Ord's G_i^* 의 Z값으로 온실가스 배출량을 핫스팟 지역을 도출한 분석결과이다.

성남시 핫스팟 분석결과, 온실가스 배출량이 주변 지역보다 낮은 콜드스팟 지역과 주변 지역보다 높은 핫스팟



Source: Analyzed by author with provided by building energy data

Fig. 3. Result of hot spot analysis in Seongnam city; (a) 2013, (b) 2023



Source: Analyzed by author with provided by building energy data

Fig. 4. Results of changes in energy emissions over 10 years; (a) LISA, (b) Hot Spot

지역의 공간분포가 공간상에서 극명한 차이를 보였다. 2013년에는 분당구 지역에 총 3개(야탑동, 수내동, 구미동 일대)의 핫스팟 지역이 관찰되었다. 이는 앞서 분석된 군집-특이(LISA) 분석의 결과와도 유사한 결과임을 알 수 있으며, 이 지역들은 상대적으로 온실가스의 다(多)배출 지역인 것으로 확인되었다. 그러나 2023년에는 2013년도의 분당구 지역에서 3개의 핫스팟 이외에도 중원구 상대원1동, 분당구(삼평동, 백현동, 정자동)에 각 1개의 핫스팟이 추가되어 총 7개의 핫스팟 지역이 나타났다(Fig. 3). 이는 2013년과 비교하여 온실가스 배출량이 높은 지역이 공간적으로 확장되거나 증가하고 있음을 의미한다. 이렇게 핫스팟 지역이 확장된 원인으로는 상대원 1동의 경우는 주택재개발사업의 증가로 인한 아파트 공급의 주거지 증가와 성남 산업단지의 조성으로 산업시설의 전기 및 가스 사용량의 증가로 보인다. 또한, 분당구(삼평동, 백현동, 정자동)의 경우는 판교신도시 개발로 인한 주거지(아파트)와 상가 등 증가로 온실가스 배출량이 상승한 것으로 보인다.

4.3. 공간패턴의 변화

성남시의 지난 10년간(2013~2023) 온실가스 배출량 변화의 공간패턴 변화는 다음의 Fig. 4와 같다. 우선, 군집-특이(LISA) 분석을 통해 10년간 온실가스 배출량의 변화는 구도심(상대원1동, 신촌동, 북정동) 일대에서 큰 증가세를 보이며, 신시가지인 분당구(야탑동, 서현1동, 수내동, 구미동, 정자동) 일대는 일부 감소하는 것으로 나타났다. 분당구(신시가지) 중 유일하게 삼평동은 탄소 배출량이 매우 큰 증가세를 보이는 것이 특징적이다. 또한, 핫스팟 분석을 통해 지난 10년간의 온실가스 배출량 변화의 공간패턴을 살펴보면, 군집-특이(LISA) 분석과 유사하게 구도심(상대원1동, 신촌동, 북정동) 일대에서 탄소 배출량이 높은 핫스팟 지점들이 형성되고 있다. 한편, 신시가지인 분당구(야탑동, 서현1동, 수내동, 구미동, 정자동) 일대는 10년간(2013~2023) 온실가스 배출량 변화에서 배출량이 감소하는 콜드스팟이 형성되었으며, 삼평동만 유일하게 탄소 배출량이 높은 핫스팟으로 형성되었다. 그 원인을 토지이용의 변화를 통해 살펴보면, 삼평동은 판교신도시 지역으로 아파트 공급의 증가와 산업단지(R&D 센터, 벤처밸리, 디지털센터) 조성 등으로 에너지(전기, 가스)의 사용량이 증가한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 도심지역에서의 대다수를 차지하면서 온실가스 배출부문으로서 중요한 건물부문에서의 온실가스 감축 관리의 중요성이 증대되는 건물부문에서의 온실가스 배출량을 성남시로 한정하여 공간 데이터를 구축하고 온실가스 분포패턴 변화와 분포특성 분석을 주된 목적으로 진행되었다. 이를 위해 공간속성 자료를 가지는 개별 공시지가 및 건물부문의 에너지사용량 데이터(전기, 가스)를 속성조인 함으로써, 2013년과 2023년도의 필지별 온실가스 배출량을 산정하였다. 또한, 그 결과를 활용하여 전역적 모란지수를 적용한 공간적 자기상관 분석을 비롯하여 국지적 모란지수를 활용한 LISA 분석 및 Getis Ord's G_i^* 통계량 값을 활용한 핫스팟 분석 등을 시행하였다.

이러한 온실가스 배출량 변화의 공간패턴 분석에 따른 성남시의 온실가스 배출량 분포특성은 다음과 같다. 첫째, 2013년과 2023년 모두 건물부문의 온실가스 배출량 공간분포가 특정 공간상에서 집적하는 공간적 군집패턴이 강하게 나타났다. LISA 분석결과, 신시가지인 분당구(야탑동, 백현동, 이매동, 수내동, 정자동, 삼평동, 구미동)를 중심으로 군집하는 경향으로 나타났다. 이렇게 분당구 신시가지 지역에 온실가스 배출량이 집중된 원인을 토지이용 측면에서 살펴보면, 분당신도시를 비롯해 판교신도시 등 주거지개발로 인해 고밀 주거지역과 중심상업 지역이 밀집되면서 온실가스 배출량이 집적된 것으로 보인다. 따라서 온실가스 배출량의 LISA 분석이 HH로 나타나는 분당구 신시가지지를 중심으로 한 지역에서는 온실가스 저감 등 지자체 탄소 정책의 추가적인 마련과 정부, 지자체, 시민들의 탄소중립 실천의 노력이 더욱 필요하다. 또한, 상대원1동 HH 군집지역이 2023년에는 축소되는 경향을 보였으며, 북정동과 서현1동의 경우 2023년에 새롭게 HH 군집을 형성하는 것으로 관찰되었다.

둘째, 핫스팟 분석결과가 LISA 분석과 유사한 공간분포 패턴을 분명하게 확인할 수 있었다. 즉, LISA 분석과 유사하게 구도심(상대원1동, 신촌동, 북정동) 일대에서 탄소 배출량이 높은 핫스팟 지점으로 나타났다. 한편, 신시가지인 분당구(야탑동, 서현1동, 수내동, 구미동, 정자동) 일대는 배출량이 낮은 콜드스팟이 형성되었으며, 삼평동만 유일하게 탄소 배출량이 높은 핫스팟으로 형성되었다. 또한, 2013년에는 3개(야탑동, 수내동, 구미동 일대)의 핫스팟 지역이 관찰되었으나, 2023년에는 기존 3개의 핫스

팻 외에 상대원1동, 삼평동, 백현동, 정자동이 추가되면서 7개의 핫스팟 지역으로 변화되었다.

본 연구는 지난 10년간(2013년 ~ 2023년) 온실가스 배출량의 공간적 패턴과 분포특성이 변화된 공간적 경향을 실증적으로 분석하여 결과를 도출한 측면에서 의의가 있다. 그러나 성남시 온실가스 배출량을 건물부문에만 한정하여 분석되었다. 또한, 온실가스 배출량에 영향을 미치고 있는 복합적인 영향 요인 파악 및 인과관계에 대한 심층 분석이 수행되지 못하는 한계점이 분명히 존재한다. 따라서 이러한 한계점을 보완하여 특정 지역을 선정한 필지 단위의 온실가스 배출량 특성분석 및 영향 요인 인과관계 분석 등 후속 연구가 지속될 수 있기를 기대해 본다.

References

- Anselin L. 1995. Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geogr Anal* 27(2): 93-115. doi: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x
- Cho SH, Huh JH, Jeong YS. 2022. A study on reference energy model for the projection of greenhouse gas emissions in building sector. *Proceedings of 2022 KSES Annual Spring Conference; 2022 Apr 20 ~ Apr 22; BEACHE PALACE. Boryeong, Korea: The Korean Solar Energy Society.* p. 171.
- Choi JM. 2018. A study on the characteristics of building energy usage and greenhouse gas emissions in Gyeongsangnam-do (in Korean with English abstract). *J Reg Assoc Archit Inst Korea* 20(3): 81-88.
- Choi YS, Kim JW, Lim U. 2018. An analysis on the spatial patterns of heat wave vulnerable areas and adaptive capacity vulnerable areas in Seoul (in Korean with English abstract). *J Korea Plan Assoc* 53(7): 87-107. doi: 10.17208/jkpa.2018.12.53.7.87
- Gang NG, Kim SH, Kang EH, Choi JM. 2020. A study on the characteristics of energy consumption and development of linear regression model in residential buildings (in Korean with English abstract). *J Archit Inst Korea* 36(7): 115-122. doi: 10.5659/JAIK.2020.36.7.115
- Giest S. 2017. Big data analytics for mitigating carbon emissions in smart cities: Opportunities and challenges. *Eur Plan Stud* 25(6): 941-957. doi: 10.1080/09654313.2017.1294149
- Hong HY. 2013. Analyzing factors and spatial correction between out-migration of capital and relocation of the capital region firms to the provinces [dissertation]. Hanyang University.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC guideline for national greenhouse gas inventories.
- Jeon BY, Ahn YS, Lee MH. 2022. Analyzing spatio-temporal distribution characteristics of factory building within Sasang industrial area in Busan (in Korean with English abstract). *Urban Des* 23(2): 25-37.
- Jeong JE, Jun MI. 2013. Spatial concentrations of the elderly and its characteristics in the Seoul metropolitan area (in Korean with English abstract). *J Korean Reg Sci Assoc* 29(1): 3-18.
- Jeong YS, Cho SH, Ji CY. 2021. Scenario to reduce greenhouse gas emissions in building sector towards the goal of carbon neutrality by 2050 (in Korean with English abstract). *J Archit Inst Korea* 37(10): 189-197. doi: 10.5659/JAIK.2021.37.10.189
- Jeong YS, Mun SH, Cho SH. 2021. Analysis of greenhouse gas emission in the construction sector (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 12(4): 299-306. doi: 10.15531/KSCCR.2021.12.4.299
- Park SY, Jeong JY, You HW, Chung HW, Lee JY. 2021. Analysis of urban decline patterns based on spatial hierarchy considering regional characteristics - Focusing on Ulsan metropolitan city (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Surv Geod Photogramm Cartogr* 39(6): 571-585. doi: 10.7848/ksgpc.2021.39.6.571
- Shin HP, Choi JM. 2022. A study on the characteristics of greenhouse gas emissions by building use: Based on green together data from 2018 to 2021 (in Korean with English abstract). *J Archit Inst Korea* 38(8): 237-246. doi: 10.5659/JAIK.2022.38.8.237
- Yang Y, Qu S, Cai B, Liang S, Wang Z, Wang J, Xu M. 2020. Mapping global carbon footprint in China. *Nat Commun* 11(1): 2237-2249. doi: 10.1038/s41467-020-15883-9
- Yeo KH, Yi MS. 2023. A study on the changes and

- characteristics of local safety index spatial patterns in Korea: Focusing on the difference between 2015 and 2020 (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Surv Geod Photogramm Cartogr* 41(5): 331-342. doi: 10.7848/ksgpc.2023.41.5.331
- Yeo KH, Yu SC. 2023. A study on green house gas distribution characteristics in the building sector and carbon neutral policy direction in Suwon-city: Using spatial big data (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Surv Geod Photogramm Cartogr* 41(2): 99-107. doi: 10.7848/ksgpc.2023.41.2.99
- Yeo KH. 2024. Spatial distribution of greenhouse gases by use in the building sector and carbon neutral policy direction in Anyang-si, Gyeonggi-do. *J Korean Soc Surv Geod Photogramm Cartogr* 42(2): 113-122. doi: 10.7848/ksgpc.2024.42.2.113
- Yi MS, Yeo KH. 2021. An analysis on the spatial pattern of local safety level index using spatial autocorrelation - Focused on basic local governments, Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Surv Geod Photogramm Cartogr* 39(1): 29-40. doi: 10.7848/ksgpc.2021.39.1.29
- Yu SC, Shin DB, Ahn JW. 2019. A study on spatial analysis of greenhouse gas emissions in building sector used by the spatial big data in case of Seoul (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Geospat Inf Sci* 27(4): 11-19. doi: 10.7319/kogsis.2019.27.4.011