

도시화 형태와 미세먼지와의 상관성 분석 : 5개 광역시 사례*

강 상 준**

본 연구의 목적은 군집 개발과 파편화된 개발이 PM10 미세먼지 농도와 순위상관관계를 보이고 있는지를 국내 주요 광역시를 사례로 살펴보는 것이다. 연구대상지로는 대전광역시, 대구광역시, 울산광역시, 부산광역시, 광주광역시를 선정하였고 PM10을 주요 미세먼지 해석지표로 설정하였다. PM10 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)자료로는 1995년부터 2019까지 25년 연간 측정값(Annual values)을 사용하였다. 연구방법으로는 형태학적공간패턴분석(MSPA), 공간적 자기상관성분석, 스피어만 상관성분석이 사용되었다. 주요결과는 다음과 같다: (1) PM10 농도와 군집개발 비율과는 양의 순위관계를 보이고 있다($\rho = 0.264, p < 0.01$). (2) PM10 농도와 파편화 개발 비율과는 음의 순위관계성을 보이고 있다($\rho = -0.298, p < 0.01$). (3) PM10 농도와 군집개발에 대한 Moran's I와는 순위관계성을 보이지 않는다($\rho = 0.060, p > 0.05$). (4) PM10 농도와 파편화 개발에 대한 Moran's I와는 순위관계성 없음으로 나타난다($\rho = 0.080, p > 0.05$). 본 연구는 미세먼지 관점에서는 도심 내 대기순환을 위한 공간을 마련해줄 수 있는 나홀로 개발형태가 긍정적일 수 있다라는 것을 보여준다. 이는 궁극적으로 도심 바람길과 같은 대기순환을 위한 공간마련이 중요하다는 점과 이는 수도권 토지이용관리에 있어 시사하는 바가 크다.

주제어 _ 공간적 자기상관성, 도시화 형태, PM10, 형태학적 공간패턴분석

* 이 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2020S1A5A2A03049104)

** 국립강릉원주대학교 도시계획·부동산학과 부교수

Analysis for the Relations between PM10 and Urbanization Pattern : the Case of 5 Metropolitan Cities*

Sangjun Kang**

The purpose of this study is to explore if there is a ranking association between core-fragmented developments and the concentration of PM10 by the case of five metropolitan cities including Daejeon, Daegu, Ulsan, Busan, and Gwangju. The used PM10 concentration data ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) are the annual values for the period from 1995 to 2019. The research methods are morphological spatial pattern, spatial autocorrelation, and spearman analyses. The major findings are (1) the positive ranking association between PM10 concentration and core development proportion ($\rho=0.264$, $p<0.01$). (2) the negative ranking association between PM10 concentration and fragmented development proportion ($\rho=-0.298$, $p<0.01$). (3) No significant associations between PM10 concentration and Moran's I values based on the core and fragmented development proportions ($\rho=0.060$, $\rho=0.080$, respectively, $p>0.05$). This study shows that the fragmented development pattern has a positive role for the PM10 management which allows more room for the air circulation. It implies that the importance of wind ways for the land use management in the Seoul metropolitan areas.

Key words _ PM10, morphological spatial pattern analysis, spatial autocorrelation, urban pattern

* This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2020S1A5A2A03049104)

** Associate Professor, Dept. of Urban Planning-Real Estate, Gangneung-Wonju National University

I. 서론

도시지역에서의 미세먼지 또는 폭염현상 등은 도시화 등으로 인한 토지이용 변화와 관련이 있음이 여러 기존연구를 통해 논의되고 있다. 구체적으로는 다양한 토지이용 개념들이 도심 내 미세먼지나 폭염현상 등의 대기환경과 갖는 관계성 관련 연구들이 여러 차례 이루어져 왔다. 특히 최근 국내에서는 김희철·안건혁(2011), 남기찬 외(2008), 조운애(2009) 등을 비롯한 여러 연구에서 도시공간구조 또는 도심내 교통통행량과 대기환경과의 관계성에 대한 연구를 진행하였다. 그들의 연구에 따르면 교통량 증가와 에너지사용량 증가를 초래하는 기존의 도시화 형태는 특히 도시 열환경에 매우 부정적 영향을 초래한다고 한다. 또한 조희선 외(2014)은 도시 열환경은 도시의 공간구조와도 관련이 있음을 주장하고 있다. 토지이용이나 인구 및 개발의 규모와 밀집도, 그리고 도로교통망 등은 도시공간구조의 기본을 이룬다.

기존 여러 연구들은 도시화와 도시열섬을 살펴보았는데 도시화와 대기환경과의 관계는 도시열섬현상에 국한되지 않는다. 최근에는 미세먼지와 같은 대기질 또한 도시화와의 관계성 속에서 논의되고 있다. 미세먼지는 주로 PM₁₀, PM_{2.5}를 대상으로 연구되는데 정종철·이상훈(2018)은 서울시 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 분포도를 제작하고 그에 영향을 미치는 것으로 판단되는 공간요인들과의 관계성 분석을 수행하였고 상업 및 교통지역 면적과 미세먼지 농도분포와 높은 관련성을 주장하였다. 강상준(2020)은 수도권 일대를 대상으로 녹지, 습지, 초지 등으로 구성되는 그린인프라의 형태학적 특성과 PM₁₀ 미세먼지와의 관계성을 살펴보았다. 그에 따르면 지역 내 수도권 시군들에 입지한 그린인프라가 점차 증가함에 따라 미세먼지 농도가 순차적으로 낮아지는 순위 관계성은 나타나지 않은 것으로 기술하고 있어 국지적 관점에서의 녹지요소들의 미세먼지 저감효과분석의 필요성을 언급하였다. 미세먼지 농도를 비롯하여 배출량과 토지피복과의 관계성 연구도 진행되고 있다. 이영진 외(2020)는 경기도를 대상으로 미세먼지 배출량과 토지피복과의 상관성을 살펴보고 통계적으로 유의한 수준으로의 관계성을 보여주었다. 맹지연(2013)은 미세먼지를 비롯하여 이산화황과 이산화질소를 포함하여 도시의 특성변수와 대기오염과의 상관관계를 살펴보았는데 시가지의 인구밀도와 개인 교통수단이 미세먼지와 관계가 있음을 보여주었다. 미세먼지와 도시화 또는 도시화 특징과의 관계성은 앞서 기술한 바와 같이 주로 총량적 관점에서 논의되고 있다. 하지만, 오규식·정희범(2007)은 도시 개발밀도 변화가 PM₁₀ 농도에 영향을 미치고 있다는 결과를 도출하였고, 류형원(2019)은 PM₁₀ 농도와 토지피복 간의 상관성 평가를 살펴보았는데 시가지 건조지역과 PM₁₀ 농도와 정의 상관관계가 도출되었고, 산림지역 및 습지에서는 부의 상관관계가 도출되었음을 보여주고 있다. 이는 곧 총량적 관점에서의 토지이용과 PM₁₀ 미세먼지

와의 관계성, 특히 도시화 현상과 미세먼지와의 관계성은 상당부분 학계의 공감대가 형성되고 있음을 뒷받침하고 있다.

일부 기존 연구에서는 이와 같은 총량적 관점뿐 아니라 공간적 위치분배 관점에서의 미세먼지 논의 필요성이 제기되기도 하였다. 예를 들면 이영진 외(2020)에 따르면 동일한 면적의 토지피복이지만 공간배치를 다르게 하면 동일한 배출량과 기상 조건일지라도 확산 시 미세먼지 농도 분포의 변화가 달라질 가능성이 있다는 점을 지적하였다. 이는 총량적 관점에서의 논의와는 다른 토지이용의 위치·분배 관점에서의 미세먼지 연구 필요성을 의미한다고 이해할 수 있다.

이러한 공간상 위치분배(Spatial allocation) 개념을 담고 있는 토지이용 최적화는 일반적으로 토지 이용들에 대한 크기와 형태를 결정하는 최적화 과정을 의미한다(Chen and Chen 2006). 또한 이러한 최적화 과정을 이해하기 위한 토지이용 공간패턴분석(Spatial pattern analysis)과 공간모델링은 매우 광범위하게 논의되고 있다(Antrop, 2004, 2000; Carsjens GJ & van der Knaap, 2002; Chen et al, 2003; Yin et al, 2010).

압축도시 개념은 토지이용 공간패턴분석의 대상으로 기존 연구에서 여러 차례 논의되고 있다. Breheny(1992)는 압축도시를 기존 중심지의 고밀개발, 직주근접, 토지이용의 유형 및 기능의 복합화, 충분한 녹지 및 광장 등의 오픈스페이스 확보를 통해 무분별한 도시확산을 지양하는 개발형태라고 정의하고 있다. 오민준·정재용(2011)은 압축도시는 미국에서 논의되어 온 뉴어버니즘, 스마트성장, 영국의 어번빌리지 등 새로운 도시계획 개념들의 실천적 전략으로의 의미가 크다는 점을 지적하고 있다. 이러한 압축도시 개념과 관련하여 여러 선행연구들은 도시의 고밀수준을 살펴보기 위하여 인구의 규모와 밀도와 인구 및 개발의 분포의 압축수준을 이해하기 위해 군집도, 분산도 등의 개념과 지표 등을 사용하고 있다(김승남 외, 2009; 남기찬 외, 2008; 임은선 외 2006). 이들의 연구에서는 압축형 도시공간구조는 통행량을 감소시키고 대중교통의 발달과 접근성 향상을 초래하게 되며 이는 곧 연료소비 감소와 효율적 에너지소비 환경을 조성하게 됨에 따라 궁극적으로 대기오염 감소에 긍정적이라는 의견이 제시되고 있으나 일부에서는 고밀화된 도시공간구조는 오히려 대기질에 부정적이라는 의견 또한 찾아볼 수 있다.

본 연구에서는 토지이용의 형태로 나타나는 토지이용 위치와 분배는 PM10 미세먼지 농도와 유의미한 관계성을 가진다는 가설을 설정하였다. 한혁 외(2018)에 따르면 국내의 경우 미세먼지는 2005년 특별법을 통해 수도권 대기환경관리 기본계획을 마련하였고 NOx, SOx, VOC 감축도 포함하나 PM10에 주안점이 있다는 점을 고려해서 본 연구에서는 PM10을 주요 미세먼지 해석지표로 설정하였다. 본 연구의 목적은 군집 개발과 파편화된 개발이 PM10 미세먼지 농도와 순위상관관계를 보이고 있는지를 국내 주요 광역시를 사례로 살펴보는 것이다. 군집 또는 파편화 개발과 같이 다소 개념적으로 정의될 수

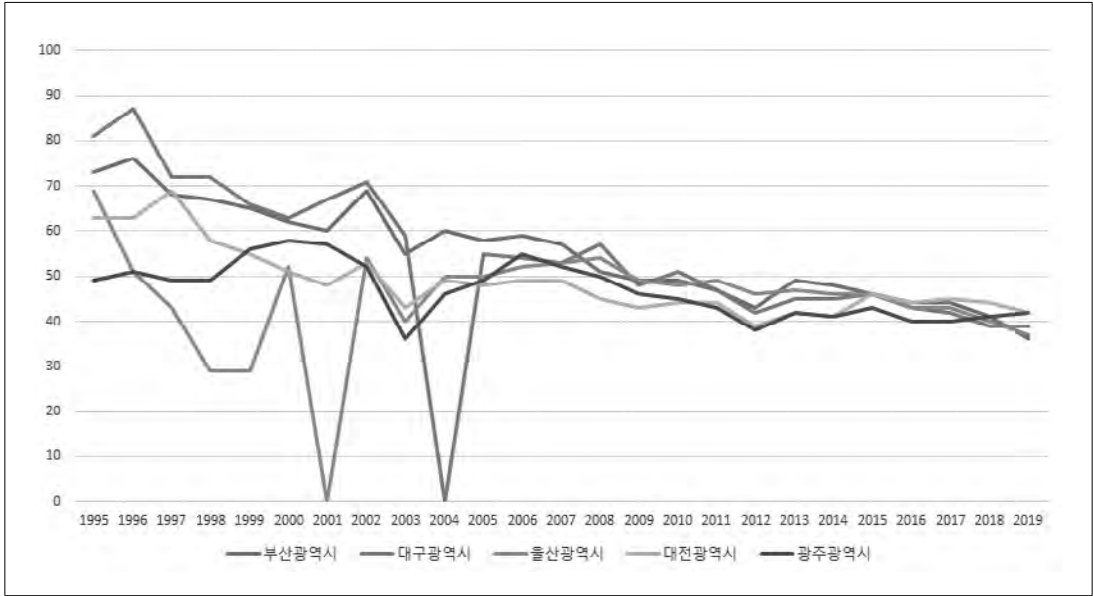
있는 특정한 개발의 형태와 미세먼지와의 관계성 고찰은 직관적으로 관찰할 수 있는 평면적 토지이용의 위치분배 전략이 PM10 미세먼지 농도에 미치는 영향에 대한 이해도를 높여줄 것으로 기대한다. 또한 이러한 시도는 토지이용 위치분배가 갖는 다양한 영향분석에 대한 실증연구로서의 의미를 가지고 있다.

II. 연구방법

시가화 지역으로 표현되는 도시화의 형태학적 특징과 PM10 미세먼지 농도와의 상관성 이해를 위해 본 연구는 다음의 순서로 진행하고자 한다. 첫째, 미세먼지 지표를 선정한다. 둘째, 도시화의 형태학적 특징을 구분 지을 수 있을 정도로 도시화 지역을 선정한다. 셋째, 연구대상지의 PM10 미세먼지 농도 자료를 수집한다. 넷째, 연구대상지 토지피복도 자료를 수집한다. 다섯째, 토지피복도 자료와 공간형태학적공간패턴분석을 통한 군집·파편화 개발지역(Core·Islet development)을 분석한다. 이때 본 연구에서 논의하는 군집개발이란 기존의 연구를 참조하여 국내에서 찾아볼 수 있는 기존 시가화 지역과 공간적 연계성 없는 파편화된 난개발과 상반된 개념으로 기존 시가화 지역과의 공간적 연계성을 가지고 이루어진 평면적 관점에서의 압축도시 형태의 시가화 개념으로 설정하였다(강상준·권태정, 2019; 김종성·강정은, 2018). 여섯째, 군집·파편화 개발지역(Core·Islet development)에 대한 공간적 자기상관성 분석을 수행한다. 일곱째, 군집·파편화 개발지역(Core·Islet development) 비율과 PM10 지표 값과의 스피어만 순위상관성을 분석한다. 마지막으로 군집·파편화 개발지역(Core·Islet development)의 Moran's Index와 PM10 지표 값과의 스피어만 순위상관성분석 과정으로 진행되었다.

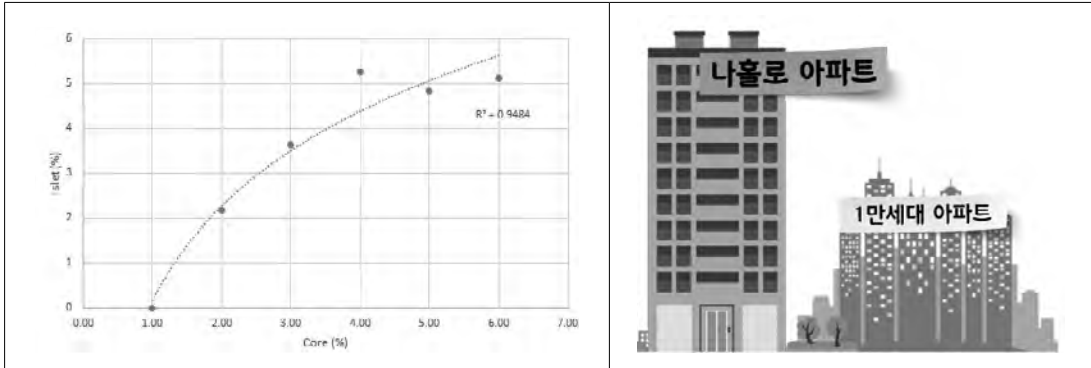
연구대상지로는 대전광역시, 대구광역시, 울산광역시, 부산광역시, 광주광역시를 선정하였다. 광역시는 일반적인 시군에 비해 규모 있는 정도로 도시화 관찰이 가능하다는 점을 가정하였다. 인천광역시는 행정구역 내 많은 지역이 도시화된 특성을 갖는 수도권 도시화의 특성을 보이고 있어 연구대상지로 설정하지 않았다. PM10 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 대기환경연보(국립환경과학원, 2020)에서 제공되는 1995년부터 2019년까지 25년 연간 측정값(Annual values)을 사용하였다. 2021년 4월 기준 대기환경연보의 연도별 도시별 PM10 미세먼지농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 측정값은 1995년부터 2019년까지 제공되고 있다. 1995년부터 2019년까지 25년 동안의 PM10 농도추이는 <그림1>과 같다. PM10 미세먼지 농도는 5개 광역시 모두에서 과거에 비해 점차 낮아지고 있는 추세를 보이고 있는데 PM10 농도는 2004년까지는 지역별 큰 폭의 차이를 보였으나 2005년부터 유사한 정도로 농도 값을 보이는 것으로 나타난다<그림 1>.

〈그림〉 연구대상지 PM10 미세먼지 농도추이(1995-2019)



본 연구에서는 2018년 토지피복과 25년간의 PM10 농도 값과의 상관성을 살펴본다. 단일연도의 토지피복도 자료와 여러 해의 PM10 값을 살펴보는 것은 현재의 토지이용 상태는 지난 수십 년 동안의 토지이용행위의 결과로 볼 수 있다는 것이며 그 기간 동안 지역별로 별도의 성장관리정책이 시행되지 않았다는 가정을 바탕으로 한다. 이와 관련하여 미국 도시들의 스프롤 수준과 폭염과의 관계성 연구에서는 본 연구와 동일한 가정을 바탕으로 스프롤에 가까운 도시일수록 지난 30년 동안의 폭염 정도가 높았음을 보여주었다(Stone et al, 2010). 이와 더불어 본 연구의 진행과정에서 나타난 연구대상지의 군집 개발지와 파편화 개발지 관계를 보면 상호 간 규모의 편차는 크지만, 군집개발이 증가함에 따라 파편화 개발도 함께 증가하는 경향을 보이고 있어 두 개발유형은 높은 양의 관계를 갖는 것을 알 수 있다 ($r^2 = 0.9484$)〈그림 2〉. 이는 연구대상지의 경우 지난 기간 파편화 개발 억제 등의 토지이용정책이 입안되지 않았거나 또는 입안되었더라도 정책효과는 현재 시점에서는 눈에 띄지 않음을 일부 암시하고 있다. 본 연구에서는 환경부에서 제공하는 2018년 대분류토지피복도가 사용되었다(촬영시기 2018년-2019년, 해상도 30m, <https://egis.me.go.kr/intro/land.do>).

〈그림 2〉 연구대상지의 균집 및 파편화 개발의 상관관계(좌), 파편화 사례 이미지(우)

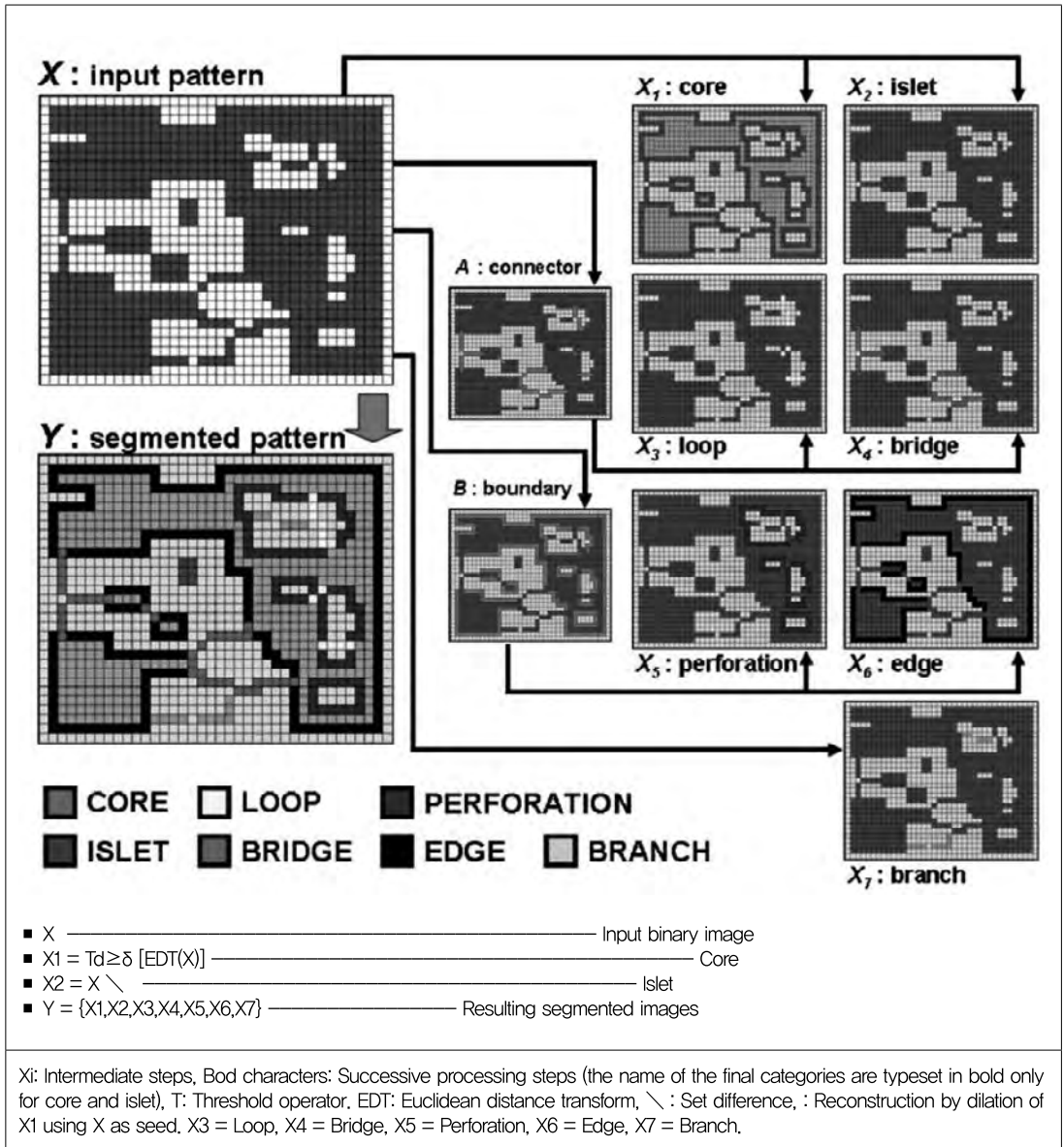


자료(우측사진). <https://www.econovill.com/news/articleView.html?idxno=320417> (저작권침해 의사없음)

형태학적공간패턴분석(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)은 공간자료나 이미지 자료의 형태학적 패턴을 이해하기 위해 사용되는 연구방법이다. MSPA 분석방식은 이웃(Neighbor)을 정의하는 연결성 법칙(Connectivity rule)과 유효경계 폭(Effective edge width)을 정의하는 변수값에 의해 결정되는 균집지역(Core area)를 계산하는 것으로부터 시작된다(Soille & Vogt, 2009; Wickham et al, 2010). MSPA를 이용한 공간자료는 균집(Core), 섬형(Islet), 교량형(Bridge), 고리형(Loop), 가지형(Bbranch), 경계형(Edge), 천공형(Perforation) 형태로 분류된다(Soille & Vogt, 2009). 본 연구에서는 균집 개발로 정의되는 균집(Core)과 파편화 개발로 정의되는 섬형(Islet)을 중심으로 분석을 진행하였다. 이때 프로그램에서 정의되는 균집이란 Core>s(크기변수 S 보다 큼)로 파편화되지 않은 균집된 시가지 지역으로 이해할 수 있으며 섬형은 어떠한 균집 픽셀도 포함하지 않는 난개발로 인해 파편화된 나홀로 개발과 같은 공간적 형태를 의미한다<그림 2>.

Soille & Vogt(2009)에 따르면 크기변수(Size parameter, S) 증가는 균집(Core) 비율을 감소시키며 결과적으로 파편화 등의 유형을 증가시킬 수도 있다. 이와 관련하여 Vogt et al(2007)은 크기변수 S와 픽셀크기(Pixel size, P) 조정은 전체적인 형태나 각각의 형태학적 분류 상호 간 구성비에 변화는 초래하지는 않음을 보여주고 있다. 이와 더불어 높은 해상도의 입력자료와 작은 크기의 크기변수 S는 세부적인 형태학적 특성분석에 바람직하다고 주장한다(Ritters et al, 2007; Vogt et al, 2009). 본 연구에서는 MSPA 연구에서 일반적인 변수로 제안되는 경계폭 변수값(Edge Width=1), 픽셀 단위 값(30meter), 연결법칙(8 Connectivity, Queen)을 사용하였다(Soille & Vogt, 2009). MSPA 분석은 도시 및 환경계획 등 공간정보해석과 관련한 분야에서 사용되고 있다(Kang & Kim, 2015; Kang & Choi, 2014; Vogt, 2010).

〈그림 3〉 MSPA 분석에 의한 형태학적 특징 유형과 프로세스



(자료, Soille & Vogt(2009)에서 발췌)

MSPA 결과를 입력자료로 사용하여 연구대상지 각각의 군집·파편화 개발지역에 대하여 Moran's I 및 Local Indicator of Spatial Association(LISA) 분석을 시행하였다. 각 연구대상지들에 대한 공간적 자기상관성은 GeoDa (<http://geodacenter.github.io/>) 프로그램을 이용하여 기존연구를 참조하여 읍면동별로 분석하였다(강상준·권태정, 2017; 김재익·권진휘, 2013; Anselin, 1995). 각각의 광역시들에 대한 전역적 자기상관성(Global Moran' I)은 지역별 한 개의 지수 값을 보여준다. 반면에 국지적 자기상관성(LISA)는 읍면동 지역별 공간적 상관성을 보여주는데 분석결과는 95% 신뢰도 수준을 만족하는 결과들만 HH, HL, LH, LL로 표현된다. HH는 통계학적으로 유의수준의 높은 값들이 군집을 이루고 있음을 의미하며 LL는 낮은 값들의 군집을 의미한다. 또한 스스로는 낮은 값을 갖는 지역이나 주변 지역은 모두 높은값들로 이루어진 지역은 LH, 반대의 경우는 HL로 분류된다.

위에서 도출된 도시화의 형태학적 특징인 군집 또는 파편화 결과값들은 최종적으로 스피어만 상관성분석을 통해 각 지역별 PM10 미세먼지 농도값과 순위관계성 관점에서 비교분석되었다. 비모수검정에 해당하는 스피어만 분석은 토지이용, 도시경관, 또는 지역경제 관점의 관계성 연구에서 사용되었다(Salvati et al, 2015; Zambon et al, 2017).

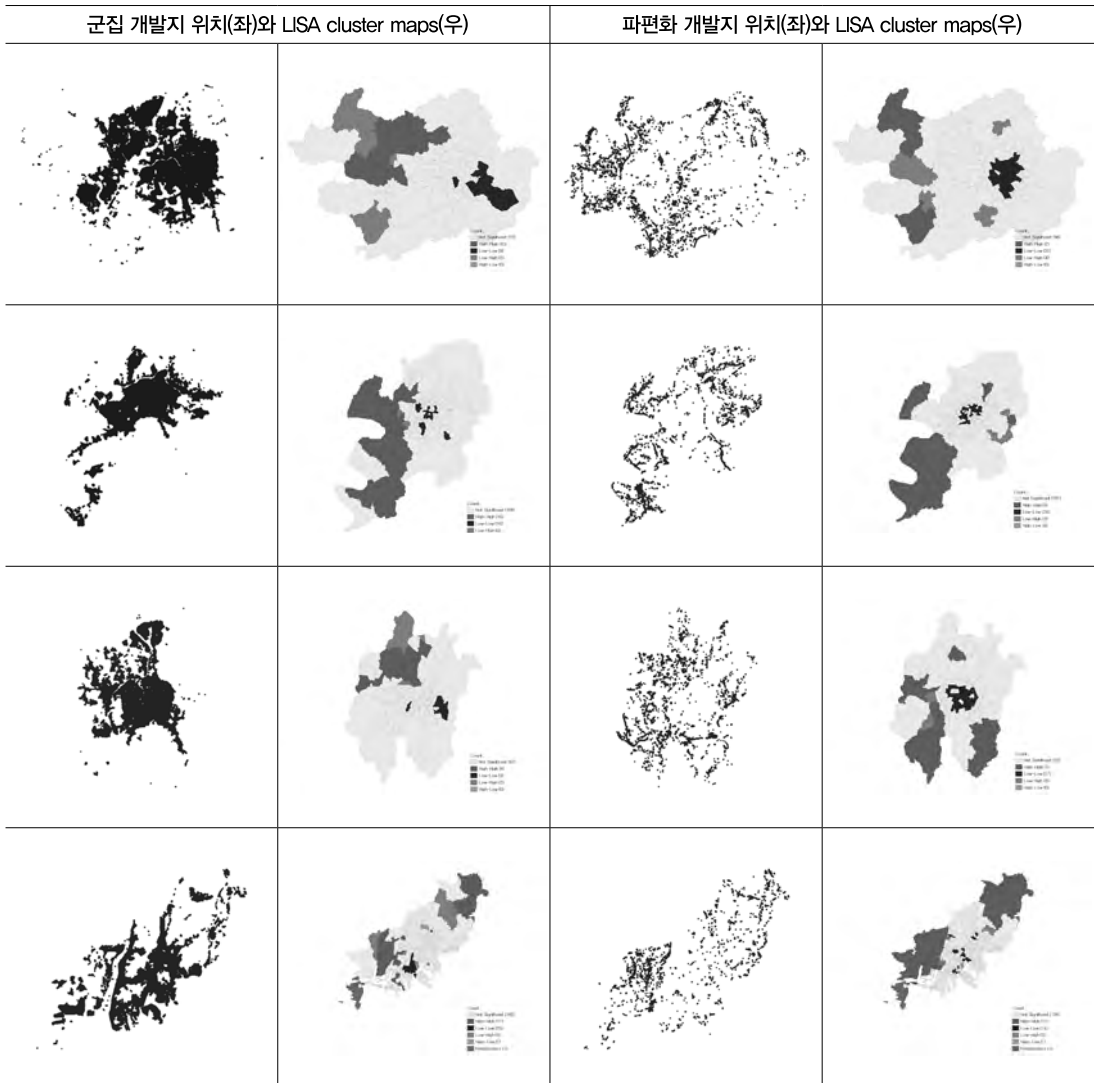
III. 분석결과

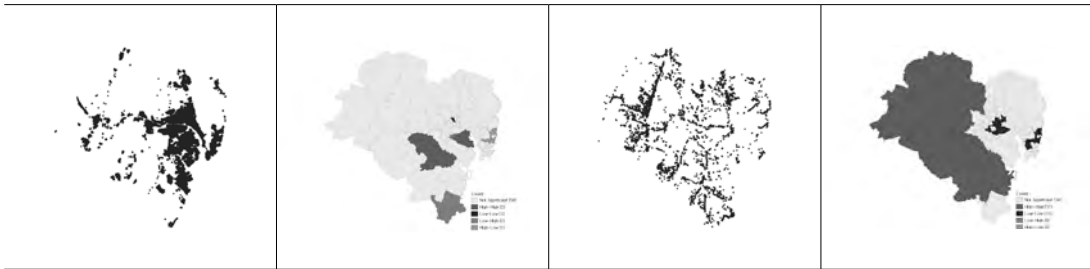
1980년부터 2010년까지 지난 30년간 시가지 변화량을 살펴보면 광주광역시(70,637 km²)가 가장 많은 시가지 증가를 보이며 다음으로 부산광역시(64,653 km²), 울산광역시(64,018 km²), 대전광역시(42,223 km²), 대구광역시(32,563 km²) 순으로 나타나고 있다(<http://egis.me.go.kr/atlas/view.do?id=104§ion=06&pageNo=1&keyword=>). 2018년 대분류토지피복도 기준 시가지 비율은 부산광역시 30%, 대구광역시 22%, 울산광역시 15%, 대전광역시 22%, 광주광역시 27% 정도로 나타나고 있다. 시가지 중 군집(Core)형 개발비율이 가장 높은 지역은 대구광역시(76%), 부산광역시(72%), 광주광역시(71%), 대전광역시(69%), 울산광역시(68%)로 나타나고 있으며 파편화 개발(Islet)은 울산광역시(5.3%), 광주광역시(5.1%), 대전광역시(4.8%), 대구광역시(3.6%), 부산광역시(2.2%) 순서를 보인다. 울산광역시는 시가지 변화량, 시가지 비율, 군집개발비율 등을 고려해 볼 때 다른 지역에 비해 높은 정도의 파편화 개발 형태를 보이고 있다.

〈표 1〉 연구대상지 토지피복 시가지 비율 및 변화량 추이

	시가지 변화량 (1980-2010, Km2)	시가지 비율 (2018, %)	시가지화 유형 (%)			Moran's Index	
			군집	파편화	그 외	군집	파편화
부산광역시	+ 64,653	29.96	72.3	2.2	25.5	0.074	0.489
대구광역시	+ 32,563	21.99	75.8	3.6	20.6	0.398	0.577
울산광역시	+ 64,018	14.49	67.9	5.3	26.8	0.064	0.725
대전광역시	+ 42,223	22.01	69.4	4.8	25.8	0.214	0.261
광주광역시	+ 70,637	27.40	70.6	5.1	24.3	0.257	0.27

Figure 4. 군집 및 파편화 개발지 위치와 LISA cluster maps





(Note. 붉은색: HH, 파랑색: LL, 다른색은 LH 또는 HL를 나타냄. 위에서 아래로 광주광역시, 대구광역시, 대전광역시, 부산광역시, 울산광역시)

군집개발 Moran's I 값의 경우 연구대상지 모두가 낮은 정도의 자기상관성을 보이고 있으나 그중 대구광역시가 다소 높은 편이다(부산광역시 $I=0.074$, 대구광역시 $I=0.398$, 울산광역시 $I=0.064$, 대전광역시 $I=0.214$, 광주광역시 $I=0.257$). 파편화 개발의 경우 군집개발보다 시가지 지역에서 차지하는 비율은 낮은 반면 비교적 높은 정도의 자기상관성을 보이고 있다(부산광역시 $I=0.489$, 대구광역시 $I=0.577$, 울산광역시 $I=0.725$, 대전광역시 $I=0.261$, 광주광역시 $I=0.27$). LISA cluster map은 각 광역시 내 어느 지역에서 공간적 이질성 또는 상관성이 관찰되는지를 보여주는데 군집개발의 경우 타 지역에 비해 대구광역시에서 다소 넓게 나타나며 파편화 개발은 울산광역시에서 비교적 높은 공간적 자기상관성(HH)이 나타나고 있다<그림 4>.

마지막으로 25년간의 PM10 미세먼지 농도와 5개 광역시에서 산출한 군집·파편화 개발과의 순위상관성은 아래와 같다: (1) PM10 농도와 군집개발 비율과는 양의 순위관계를 보이고 있다($\rho = 0.264$, $p < 0.01$). (2) PM10 농도와 파편화 개발 비율과는 음의 순위관계성을 보이고 있다($\rho = -0.298$, $p < 0.01$). (3) PM10 농도와 군집개발에 대한 Moran's I와는 순위관계성을 보이지 않는다($\rho = 0.060$, $p > 0.05$). (4) PM10 농도와 파편화개발에 대한 Moran's I와는 순위관계성 없음으로 나타난다($\rho = 0.080$, $p > 0.05$).

IV. 결론

도시화의 총량적 증가는 도시 열환경을 포함하여 미세먼지 농도에도 부정적이라는 것은 여러 선행연구에서 다루어져 왔다(조희선 외, 2014; 맹지연, 2013; 이영진 외, 2020). 제한된 토지자원환경 내에서 위치 및 분배 최적화를 통한 효율성 증대는 토지이용계획의 궁극적 지향점이라 할 수 있다. 따라서 형

태학적 특성으로 표현되는 토지이용의 공간상 위치·분포개념과 대기환경과의 관계성 연구는 다양한 관점에서의 바람직한 토지이용계획의 의미를 이해할 수 있는 기회를 제공한다는 점에서 그 의의가 크다.

25년간의 연간 PM10 미세먼지 농도와 비수도권 광역시의 군집 또는 파편화 개발과의 순위관계성은 다음과 같다. 첫째, PM10 농도와 군집개발 비율과는 양의 순위관계를 보이고 있다($\rho = 0.264$, 상관관계 0.01 수준에서 유의). PM10과 군집개발의 관계가 의미하는 바는 군집개발이 증가할수록 미세먼지 농도값도 증가하는 관계를 보인다는 것이다. 이는 미세먼지 농도개선을 위해서는 개발의 형태와 관계없이 개발의 총량 조절이 보다 의미미하다는 것으로도 해석될 수 있다. 둘째, PM10 농도와 파편화 개발 비율과는 음의 순위관계성을 보이고 있다($\rho = -0.298$, 상관관계 0.01 수준에서 유의). 파편화 개발이 미세먼지와 갖는 의미와 관련해서는 파편화 개발이 많아지면 미세먼지 농도가 낮아질 수 있다는 것을 의미하는데 파편화 개발의 경우 주변 시가지 지역과의 공간적 연계성이 낮은 만큼 그만큼의 비어있는 공간이 마련될 기회가 높으며 이는 곧 미세먼지 개선의 주요방법인 도심 내 대기순환을 위한 공간마련이 효과적이라는 점을 시사한다고 볼 수 있다. 셋째 PM10 농도와 군집개발에 대한 Moran's I와는 순위관계성을 보이지 않는다($\rho = 0.060$, 상관관계 0.05 수준에서 유의하지 않음). 넷째 PM10 농도와 파편화개발에 대한 Moran's I와는 순위관계성이 없음으로 나타난다($\rho = 0.080$, 상관관계 0.05 수준에서 유의하지 않음). 군집 또는 파편화 개발에 대한 Moran's I 결과는 대상지 안에서 국지적인 개발형태들의 상호관계성은 미세먼지 관점에서는 의미없다는 것으로 이해할 수 있을 것이다. 다만 본 연구에서 진행한 공간적 자기상관성 분석의 단위가 읍면동이며 이는 곧 읍면동 단위의 공간단위 상호간 토지이용 형태적 특성과 미세먼지농도와의 관계가 나타나지 않았다는 것을 의미한다. 이는 풍향과 풍속, 기온 등 다양한 대기인자들의 움직임을 고려할 때 미세먼지에 대한 읍면동 단위의 비교분석은 다소 과도한 연구설정일 수 있다고 이해하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 점을 고려하여 향후 도시별 국지 기후대(Local Climate Zone) 분포와 미세먼지 농도와의 상관성 등 미시적 관점에서의 관계성 연구는 미세먼지저감 관점에서의 토지이용 방향성 제시에 함의를 더해줄 것으로 기대한다.

본 연구는 미세먼지 관점에서는 군집개발보다는 오히려 도심 내 대기순환을 위한 공간을 마련해줄 수 있는 나홀로 개발형태가 긍정적일 수 있다는 점을 보여주고 있다. 이러한 연구결과는 바람직한 토지이용을 위해서 나홀로 개발과 같은 파편화 개발이 필요하다라기 보다는 미세먼지 농도개선을 위해서는 도심 내 바람길과 같은 대기순환을 위한 공간마련이 중요하다는 함의를 담고 있다. 또한 수도권의 과밀한 도시화로 인해 토지이용의 형태학적 특징을 세분화하기 다소 어렵다는 점을 고려할 때 비수도권 광역시 사례를 통해 살펴 본 미세먼지 관점에서의 토지이용분석은 수도권 토지이용관리에 시사하는 바 또한 크다.

■ 참고문헌 ■

- 강상준(2020). “PM10 미세먼지농도와 그린인프라 형태학적 특성의 관계성에 대한 탐색적 분석 : 경기도 사례”. 『GRI연구논총』, 22(4): 25-40.
- 강상준·권태정(2019). “강릉시 교외 신규 개발지역의 공간 변화 추이”. 『한국도시설계학회지』, 20(2): 65-75.
- 강상준·권태정(2017). “도시확장강도와 건물침수의 공간적 관계성”. 『대한토목학회』, 37(4): 759-764.
- 국립환경과학원(2020). 대기환경연보 2020.
- 김승남·이경환·안건혁(2009). “압축도시 공간구조 특성이 교통에너지 소비와 대기오염 농도에 미치는 영향”. 『국토계획』, 44(2): 231-246.
- 김재익·권진휘(2013). “수도권 통근통행의 공간적 변화와 직주분리수준의 분석”. 『교통연구』, 20(4): 79-90.
- 김중성·강정은(2018). “압축형 공간구조 특성이 도시 열환경에 미치는 영향”. 『한국도시설계학회지』, 19(1): 21-36.
- 김희철·안건혁(2011). “압축도시 계획요소가 소득계층별 통근거리에 미치는 영향”. 『도시설계』, 12(1): 55-70.
- 남기찬·임업·김홍석·이제선(2012). “공간구조가 인구성장에 미치는 영향”. 『지역연구』, 28(1): 3-18.
- 남기찬·김홍석·손민수(2008). “인구압축도와 교통에너지와의 관계 연구: 압축지표를 활용하여”. 『국토계획』, 15(1): 133-143.
- 류형원(2019). 『GWR 모델을 활용한 미세먼지(PM10)오염농도와 토지피복간의 상관성 평가: 경기도 남부 지역을 중심으로』, 공주대학교 석사학위논문.
- 맹지연(2013). 『도시특성변수와 대기오염 간의 상관관계 연구: 이산화황·이산화질소·미세먼지를 중심으로』, 가천대학교 박사학위논문.
- 오규식·정희범(2007). “도시의 개발밀도 변화가 대기오염에 미치는 영향”. 『대한국토도시계획학회지』, 42(5): 197-210.
- 오민준·정재용(2011). “국내외 지속가능한 콤팩트시티형 도시개발방향에 대한 연구”. 『대한건축학회논문집 계획계』, 27(12): 297-306.
- 이영진·함정수·황수연·최진무(2020). “경기도 미세먼지 배출량과 토지피복 유형의 관계분석”. 『한국지역지리학회지』, 26(3): 185-195.
- 임은선·이종열·이희연(2006). “도시성장관리를 위한 공간구조의 확산-압축패턴 측정”. 『국토연구』, 5:

2253-247.

조윤애(2009). “압축도시와 교통에너지소비의 관계에 대한 실증연구: 7대 광역도시를 중심으로”. 『한국 사회와 행정연구』, 19(4): 113-132.

조희선·정유진·최막중(2014). “도시공간특성이 열섬현상에 미치는 영향”. 『환경정책』, 22(2): 27-43.

정종철·이상훈(2018). “서울시 토지이용과 교통량에 따른 미세먼지의 공간분포”. 『지적과 국토정보』, 48(1): 123-138.

한혁·정창훈·금현섭·김용표(2018). “미세먼지 PM10 저감정책의 비판적 검토”. 『환경계획』, 25(1): 49-79.

Anselin L(1995). “Local indicators of spatial association(LISA)”. *Geographical Analysis*, 27: 93-115.

Antrop M(2004). “Landscape Change and the Urbanization Process in Europe”. *Landscape and Urban Planning*, 67(1-4): 9-26.

Breheny, MJ(ed.)(1992). *Sustainable Development and Urban Form*, London.

Carsjens GJ & van der Knaap W(2002). “Strategic Land-Use Allocation: Dealing with Spatial Relationships and Fragmentation of Agriculture”. *Landscape and Urban Planning*, 58(2-4): 171-179.

Chen B & Chen G(2006). “Ecological Footprint Accounting based on Energy: A Case Study of the Chinese Society”. *Ecological Modeling*, 198: 101-114.

Chen LD, Messing I, Zhang SR, Fu BJ, Ledin S(2003). “Land Use Evaluation and Scenario Analysis towards Sustainable Planning on the Loess Plateau in China – Case Study in a Small Catchment”. *Catena*, 54(1-2): 303-316.

Kang SJ & Kim JO(2015). “Morphological Analysis of Green Infrastructure in Seoul Metropolitan Area, Korea”. *Journal of Landscape & Ecological Engineering*, 11(2): 259-268.

Kang SJ & Choi WS(2014). “Forest Cover Changes in North Korea since the 1980s”, *Journal of Regional Environmental Changes*, 14(1): 347-354.

Kang JE, Yoon DK, Bae HJ(2019). “Evaluating the Effect of Compact Urban Form on Air Quality in Korea”. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(1): 179-200.

Riitters KH, Vogt P, Soille P, Kozak J, Estreguil C(2007). “Neutral Model Analysis of Landscape Patterns from Mathematical Morphology”. *Landscape Ecology*, 22: 1033-1043.

- Salvati L, Moretti V, Sabbi A, Ippolito A, Ferrara A(2015). “A Multivariate Assessment of Fringe Landscape Dynamics in Rome, Italy, and Implications for Peri-Urban Forest Conservation”. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 26: S587–S596.
- Soille P & Vogt P(2009). “Morphological Segmentation of Binary Patterns”, *Pattern Recogn Lett*, 30: 456–459.
- Stone B, Hess 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): 1425–1428.
- Vogt P(2010). *User Guide of GUIDOS*, Institute for Environment and Substantiality European Commission, Joint Research Centre, TP2611–21027 Ispra (VA), Italy.
- Vogt P, Joseph J, Ferrari, Todd L, Robert G, Kurt R, Katarzyna O(2009). “Mapping Functional Connectivity”, *Ecological Indicators*, 9(1): 64–71.
- Vogt P, Iwanowski M, Estreguil C, Kozak J, Soille P(2007). “Mapping Landscape Corridors”. *Ecol Indic*, 7(2): 481–488.
- Wickham J, Riitters K, Wade T, Vogt P(2010). “A National Assessment of GI and Change for the Conterminous United States using Morphological Image Processing”. *Landscape and Urban Planning*, 94: 186–195.
- Yin RS, Xiang Q, Xu JT, Deng XZ(2010). “Modeling the Driving Forces of the Land Use and Land Cover Cchanges along the Upper Yangtze Rriver of China”. *Environmental Management*, 45: 454–465.
- Zambon I, Serra, Grigoriadis, Carlucci, Salvati(2017). “Emerging Urban Centrality: An Entropy-based Indicator of Polycentric Development and Economic Growth”. *Land Use Policy*, 68: 365–371.

원 고 접 수 일 | 2021년 4월 5일

심 사 완 료 일 | 2021년 5월 3일

최종원고채택일 | 2021년 5월 10일

강상준 skang8@gwnu.ac.kr

2008년 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign에서 지역계획학 박사학위를 받았다. 경기연구원 연구위원을 거쳐 현재 국립강릉원주대학교 도시계획·부동산학과 부교수로 재직 중이다. 관심분야는 도시취약성을 고려한 도시계획과 도시 회복탄력성 등이다. 논문으로는 “PM10 미세먼지농도와 그린인프라 형태학적 특성의 관계성에 대한 탐색적 분석: 경기도 사례(2020)”, “강릉시 교외 신규 개발지역의 공간 변화 추이”(2019), “건물침수지역과 시가지유형간의 관계에 대한 실증분석”(2017), “도시의 시가지지역 확장과 파편화 변화분석”(2016), “사회적 비용을 고려한 커뮤니티 회복탄력성 개념의 재정립”(2014) 등 다수 발표하였다.