https://doi.org/10.22645/udi.2020.12.30.031
도시과학 제9권 제2호 2020. 12. 31 - 44쪽

수도권의 대규모 녹지공간이 대기오염에 미치는 영향 분석

김희재*

Analyzing Impact of the Effect of Large-scale Green Space on Air Pollution in the Seoul Metropolitan Area

Kim, Hee-Jae*

Abstract: This study aims to analyze the relations among greenbelt, air pollution empirically in order to assess the environmental effects of the greenbelt in the Seoul metropolitan area, objectively. For this purpose, this study conducts an empirical analysis of impacts of greenbelt on urban air pollution using a multiple-regression model. The major findings are summarized as follows. As a result of an empirical analysis of the impacts of greenbelt on air pollution, it is found that the characteristics of the city have impacts on air pollution concentration. It is found that the population and employment are the causes of increases in CO and NO_2 concentrations, and the number of employees in the manufacturers has impacts on increases of O_3 and SO_2, while power plants have impacts on PM_{10}, CO and NO_2. Intersections have impacts on O_3 and SO_2, while the areas of the roads have impacts on CO and NO_2. In addition, as for the spatial distribution of air pollutants, it is found that CO and NO_2 concentrations are relatively higher in the center of the Seoul metropolitan area, while PM_{10}, O_3 and SO_2 concentrations are relatively higher in the suburbs. It is found that air pollution concentration is low in greenbelt zone. In the greenbelt zone, PM_{10}, CO and SO_2 concentrations are low.

키 워 드: 수도권 그린벨트, 환경적 효과, 대기오염, 공간보간기법, 다중회귀분석

Key Words: Seoul's Greenbelt, Environmetal Effect, Air Pollution, Kriging Interpolation, Multiple Regression Analysis

1. 서 론

세계의 많은 도시들이 도시의 환경에 대해 관심을 갖고 있다. 그 중 특히 지구 온난화에 따른 기후변화, 수질 · 토질 · 대기질 등과 관련한 환경오염, 녹지 공간 확보 등에 대한 문제에 관심을 갖고 있다. 또한 도시민들이 높은 삶의 질을 누리기 위해서는 지속가능한 관점에서 도시를 만들어 가야 한다고 주장하고 있다(권용우 외, 2013).

전 세계는 1920년대 이후 대기오염, 온실 가스 등의 원인으로 오늘날까지 지속적으로 온도가 상승하고 있다. 최근 범 세계적으로 환경오염, 지구 온난화 등에 관심을 갖고 대기오염 총량제, 탄소 배출권제 등과 같은 제도로 오염 물질을 감소시키기 위한 노력을 하고 있다. 우리나라도 대기오염과 지구 온난화의 책임에 대해 예외는 아니다. 특히 우리나라는 경제 성장이 급속도로 발전한 지난 40년 동안 에너지 사용이 빠르게 증가하였다. 이 과정에서 온실 가스의 배출과 함께 대기오염 악화 문제를 겪게 되었으며, 1990년에서 2005년 동안의 온실가스 배출 증가량이 OECD국가 중 가장 높은 것으로 기록되었다(OECD, 2012).

온실가스 배출의 주원인은 급격한 에너지 사용으로 발생한 대기오염 물질로, 우리나라의 총 대기오염 물질은 1998년에서 2019년 사이에 증가하는 추세로 가다가 최근에 소량 감소하였다(환경부, 2019). 그러나 오존(O_3)은 전년대비 꾸준히 증가하고 있으며, 미세먼지(PM_{10})도 증가와 감소를 반복하고 있어 여전히 대기오염에 대한 우려를 하지 않을 수 없다(환경부, 2019). 특히 우리나라의 수도권은 인구 · 산업 · 교통 등의 많은 기반 시설들이 집중되어 있어 대기오염에 심각한 위협이 되고 있으며, 전국의 오염물질의 약 1/3이 수도권에 집중되어 도시민의 건강에 위협을 줄 수 있다. 이러한 대기오염은 대기오염은 허혈성심장질환, 뇌졸중, 만성폐쇄성폐질환, 폐암의 원인으로 알려져 있다(김소정 외, 2020).

이러한 사회적 이슈에 따라 최근 많은 연구자들이 지속가능한 도시를 위한 대기오염과 관련된 연구들을 수행하기 시작하였으며, 그 중 녹지공간이 대기 오염을 저감 시켜주고 있다는 녹지

* 센테크 객원연구원. 주저자(irex1@naver.com)

의 환경적 효과에 관한 연구들이 활발하게 진행되었다. 특히 녹지공간에서 대기 오염물질의 농도와 도시의 온도가 감소했다는 연구들이 활발하게 진행되어 왔으며, 그린벨트를 연구하는 학자들 역시 그린벨트가 대도시를 둘러싸고 있는 대규모 녹지공간으로서 도시의 대기오염 저감 효과와 도시온도 저감 효과가 있다고 주장하였다(Yang et al., 2005; Khan & Abbasi, 1999a, 1999b; Bengston & Youn, 2006; Nowak & Dwyer, 2007).

따라서 본 연구는 수도권에 마지막 남은 대규모 녹지공간인 그린벨트가 대기오염의 감소 효과가 있는지를 분석한다. 분석결과를 바탕으로 그린벨트가 녹지공간으로써 나아가야할 정책적 시사점을 제시하여 그린벨트와 같은 대규모 녹지 공간이 갖는 환경적 가치를 뒷받침 하는데 의의가 있다.

2. 선행연구 검토

도시 녹지가 대기오염에 미치는 연구들은 상당히 오래전부터 많은 양의 연구가 진행 되어왔다. 그린벨트 자체가 대기오염에 미치는 실증 연구에 대한 것은 그 양이 미미 하여 그린벨트를 대규모 녹지와 같다고 가정한 후 녹지가 대기오염에 미치는 효과에 대한 연구들을 중심으로 검토하였다.

녹지가 대기오염에 미치는 영향에 대한 연구들은 주로 토지이용회귀모형(LUR: Land Use Regression)을 이용하여 현재의 토지 이용이 대기오염에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. 토지이용회귀모형은 최근 대기오염물질의 노출과 교통, 도시 특성, 토지이용 등과의 관계 분석에서 많이 활용하는 모형이다(Briggs et al., 1997). 또한 선행 연구에서 사용된 대기오염의 분포는 대기오염 측정소를 기준으로 크리깅 또는 IDW 공간보간기법을 사용하여 대기오염 분포를 추정하거나 실제 대기오염 농도값의 지역 평균을 분석에 사용하였다.

기존의 선행연구들은 Table 1과 같이 크게 다섯 가지 부문의 요인들이 녹지공간이 대기오염에 미치는 영향 변수로 사용하였다. 첫째, 토지이용특성으로 도시지역, 주거지역, 상업지역, 공업지역, 본 연구의 핵심인 녹지 및 오픈스페이스, 기타지역을 사용하였다. 둘째, 인구 및 가구 특성으로 인구 및 가구 수, 인구 및 가구(주거) 밀도, 신도시 건설지역 및 개발지역을 사용하였다. 셋째, 교통 특성으로는 도로의 길이(연장)가 가장 많이 사용되었고, 고속도로나 주요 간선도로의 접근성, 주차장과 같은 교통 관련시설의 접근성, 버스정류장이나 지하철 역 같은 대중교통 접근성, 그리고 자동차 통행량이 변수로 사용되었다. 넷째는 접근성 요인으로 국경 및 항구와의 거리를 사용하였고, 주요 오염원인 공장 및 제조업체, 발전소와의 거리, 강이나 해변 같은 물과의 접근성도 변수로 사용하였다. 마지막으로 지형 요인을 사용하였는데 대기오염농도가 고도에 따라 다른 특성이 있음을 보고 고도나 높이, 건물 층수와 풍향에 대한 변수를 사용하였다.

또한 종속변수로 사용된 대기오염 물질은 대표적인 오염물질인 아황산가스(SO_2), 미세먼지(PM_{10}), 이산화질소(NO_2), 오존(O_3), 일산화탄소(CO) 같은 대표적 대기오염 물질 이외에도 벤젠(Benzene)이나 톨루엔(Toluene)같은 화학물질, BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌; Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes), 초미세먼지(PM2.5), 블랙카본(Black Carbon), 질소산화물(NOX)등의 농도와 녹지의 효과를 분석하였다.

선행연구에서 보여주는 각 도시별 대기오염에 미치는 요인들은 서로 상이하나 대부분 공통적인 특징이 있다. 각 요인별로 정리하면 다음과 같다.

첫째, 토지이용요인 측면에서 대기오염에 미치는 영향을 살펴보면, 캐나다 Ontario주의 Windsor 도시의 경우 주거 밀도가 높을수록 SO_2 농도가 0.0012ppb 높아지는 것으로 나타나 주거밀도가 대기오염의 정(+)의 상관관계가 있음을 알 수 있었다(Wheeler et al., 2008). 캐나다 Toronto 지역은 주택 밀도가 높을수록 NO_2가 증가 하였으며, 공업지역에서는 NO_2가 평균에 비해 0.163% 높게 나타나 주거밀도가 높은 곳과 공업지역에서 대기오염의 농도가 높은 것을 알 수 있었다(Jerrett et al., 2007). 캐나다 Vancouver 지역의 경우 NO_2는 상업지역에서 높게 나타났으며, PM2.5는 주거, 상업, 공업지역에서 높게 나타났다(Henderson et al., 2007). 중국 Changsha 지역 또한 NO_2와 PM_{10}가 주거지역에서 높게 나타났다(Li et al., 2015). 네덜란드 Amsterdam과 Rotterdam 지역에서는 저밀의 주거지역에서 오존(O_3)의 농도가 낮은 것으로 나타났으며(Kerckhoffs et al., 2015), 오스트레일리아 Perth 지역의 경우에는 주거 밀도가 높을수록, 상업 및 공업지역 일수록 NO_2와 질소화합물(NOX)의 농도가 높은 것으로 나타났다. 이를 종합해 보면 대기오염 물질은 주로 상업지역과 특히 공업지역에서 높은 것으로 나타났으며, 주거지역 중 저밀의 주거지역에서 대기오염물질의 농도가 낮은 것을 알 수 있다.

둘째, 인구 및 가구 요인 측면에서 영향을 살펴보면, 중국 Shanghai 지역의 NO_2 농도는 인구

Table 1. 녹지 공간이 대기오염에 미치는 영향에 대한 선행연구에서 사용된 설명 변수

변수명		Wheeler et al. (2008)	Aguilera et al. (2008)	Jerrett et al. (2008)	Meng et al. (2015)	Henderson et al. (2007)	Madsen et al. (2007)	Gilbert et al. (2005)	Montagne et al. (2015)	Lee et al. (2015)	Cho &Choi (2014)	Ho et al. (2015)	Li et al. (2015)	Dirgawati et al. (2015)	Kerckhoffs et al. (2015)	Amini et al. (2014)
토지 이용	도시		●													
	주거					●				●			●			
	상업					●				●				●		●
	공업		●	●	●	●			●	●	●	●		●		●
	녹지/ 오픈스페이스				●	●		●			●	●	●		●	●
	기타												●			●
인구 및 가구	인구/주거 (밀도)	●		●	●			●	●		●	●		●	●	
	건설/개발지역									●						
교통	도로접근성	●						●	●	●						
	도로연장	●	●		●	●	●	●		●		●	●	●	●	●
	도로면적									●						
	교통시설 /대중교통접근성		●													●
	교통량			●		●		●		●				●	●	
접근성	국경/항구거리	●							●			●				
	주요오염원거리	●														
	강/해변거리									●						
지형	고도		●			●	●					●				
	풍향												●			

가 많은 지역에서 높으며, 캐나다 Vancouver와 Montreal 에서는 인구밀도가 높은 지역에서 NO와 NO_2의 농도가 높은 것으로 나타났다(Meng et al., 2015; Henderson et al., 2007; Gilbert et al., 2005). 또한 서울의 인구밀도가 높을수록 O_3을 제외한 PM_{10}, CO, O_3, NO_2의 농도가 높았으며, 특히 제조업 고용자수가 많아질수록 다섯가지 오염물질의 농도가 증가하였다(Cho & Cho, 2014). 이를 종합하면 인구 밀도와 제조업의 고용밀도는 대기오염 물질 증가에 정(+)의 영향을 주며 특히 NO와 NO_2 물질 농도 상승에 영향을 주는 것으로 나타났다.

셋째, 교통 요인 측면의 영향을 살펴보면, 모든 연구에서 도로연장, 통행밀도, 교통량 도로접근성은 NO와 NO_2 농도 증가에 정(+)의 영향을 주고 있어 이들 요인이 대기오염물질을 증가시키는 것으로 나타났다. 특히 스페인 Sabadell 지역 교통 시설 중 주차장과의 거리가 가까울수록 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes)의 농도가 평균 농도에 비해 4.3% 높은 것으로 나타났다(Aguilera et al., 2008). 그 외에도 버스터미널, 공항, 항구과 가까울수록 PM_{10}의 농도가 높은 것으로 나타났다(Amini et al., 2014; Montagne et al., 2015). 따라서 대부분의 교통 요인들은 대기오염 증가에 영향을 주는 것으로 나타났다.

넷째, 그 밖의 요인으로 고도에 따른 대기오염 물질 농도와의 관계를 살펴보면, Madsen et al.(2007)은 노르웨이의 Oslo 지역의 이산화질소(NO_2), 일산화질소(NO), 질소화합물(NOX)과 도시 특성과의 관계를 분석하였는데 고도가 1m 낮아질수록 각각 농도가 이산화질소(NO_2) 66.3%, 일산화질소(NO) 48%, 질소화합물(NOX) 59.6% 높은 것으로 나타나 고도에 따라 대기오염의 농도가 다른 것을 알 수 있다.

마지막으로 녹지 및 오픈스페이스가 대기오염에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다. 중국 Shanghai에서는 농촌녹지지역 반경 5km지역에서 1.69.E-07 $\mu g/m^3$ 만큼 농도가 낮아지는 것으로 나타나 농촌녹지지역에서 농도가 낮은 것으로 나타났다(Meng et al., 2015). 캐나다 Vancouver 지역에서는 PM2.5의 농도가 오픈스페이스에서는 0.02 $\mu g/m^3$만큼 낮아지는 것으로 나타나 오픈스페이스의 중요성을 강조하였다(Henderson et al., 2007). 캐나다 Montreal 지역은 NO_2가 오픈스페이스 지역 일수록 1ha당 2.7% 낮아지는 것으로 나타나 도시에서 오픈스페이스의 중요성을 강조하였다(Gilbert et al., 2005). 타이완의 Taipei 지역의 PM2.5를 구성하고 있는 Si(규소)와 S(황)는 도시녹지지역과 자연녹지지역 5km 반경 내에서 각각 14.26 $\mu g/m^3$, 6.59 $\mu g/m^3$만큼 낮은것으로 나타났다(Ho et al., 2015).

우리나라 서울의 경우 녹지면적은 1% 증가할수록 SO_2, CO, PM_{10}의 농도가 각각 0.15ppm, 13.72ppm, 43.387 $\mu g/m^3$만큼 낮아졌으나 NO_2와 O_3의 경우 각각 0.005ppm, 0.0091ppm 증가하는

것으로 나타나 서울과 같은 컴팩트 도시에서 녹지의 중요성을 강조하였다. 또한 해외 도시를 대상으로 수행한 연구와는 다르게 NO_2와 O_3 농도는 높아지는 것으로 나타나 우리나라는 해외의 도시와 대기오염이 다른 패턴으로 나타나는 것을 확인하였다(Cho & Choi, 2014).

또한 계절별로 녹지공간이 대기오염에 미치는 영향이 다른 것을 확인 할 수 있었다. Li et al.(2015)의 연구에서는 중국 Changsha 지역의 NO_2가 사계절 중 겨울철 녹지공간에서 6.496.E-06 $\mu g/m^3$으로 가장 낮은것으로 나타났으며, Kerckhoffs et al. (2015)의 연구에서 네덜란드 Amsterdam과 Rotterdam 지역을 중심으로 O_3의 농도가 여름철에는 녹지공간 500m 주변지역의 농도가 1.12 $\mu g/m^3$만큼 높은 것으로 확인되어 녹지가 발생시키는 산소가 오존 생성에 영향을 주는 것으로 나타나 그린벨트 지역에서도 오존 농도가 높을것으로 예상되었다. Amini et al. (2014)의 연구에서는 이란 Tehran 지역의 아황산가스(SO_2)가 따뜻한 계절의 녹지공간에서 1㎡당 8.65E-05 $\mu g/m^3$ 만큼 낮은 것으로 나타났다. 이와 같이 녹지 및 오픈스페이스 공간에서는 대기오염의 농도가 낮거나 감소하는 효과가 있는 것이 본 선행연구를 통해 확인되었다.

선행연구들을 종합하면 그린벨트가 대기오염에 미치는 효과에 관한 대부분의 선행연구들은 종속변수를 대기 오염물질을 사용하였으며, 대기오염에 미치는 요인들을 토지이용회귀모형을 이용하여 분석하였다. 공통적으로 사용된 변수의 특성으로는 토지 이용 특성, 인구 및 가구 특성, 교통 특성, 접근성 요인, 지형 특성 등이 사용되었다. 또한 대기오염의 분포현황을 공간보간기법 또는 지역별 평균데이터를 이용하여 추정 또는 계산하여 사용되었다. 분석 결과 토지이용 특성에서 도시 지역, 공업 지역 및 상업 지역은 대기오염물질의 농도가 높은 것으로 나타났으며, 인구 및 주거 밀도가 높은 지역에서 대기오염의 농도가 높은 것으로 나타났다. 교통 특성에서는 도로 연장이 길수록 대기오염의 농도가 높아지며, 교통량이 많을수록 대기오염의 농도가 높은 것으로 나타났다. 접근성 요인으로 국경이나 항구 같이 도시의 외곽지역에 가까울수록 갈수록 농도가 높으며, 강, 수변공간등과 같은 물이 있는 지역과 가까울수록 대기오염의 농도는 낮아지는 것으로 나타났다. 그리고 본 연구의 주제와 관련된 녹지공간과 대기오염과의 관계에서는 녹지공간에서 대기오염의 농도가 낮은 것으로 나타났다.

이렇게 기존의 선행연구들은 도시 공간의 특성과 지표면의 특성이 대기오염에 미치는 효과와 그 요인들까지도 파악하는데 충분히 이루어졌으며, 특히 녹지공간이 대기오염 물질의 양을 감소시키는데 기여한다는 사실을 확인할 수 있었다. 그러나 기존의 연구들은 녹지공간이 환경에 미치는 요인을 도시의 물리적 요인으로 바라본 한계가 있다. 도시 환경에는 물리적 요인 뿐만 아니라 사회 경제적 속성도 같이 미치고 있다. 따라서 본 연구는 그린벨트가 온도에 미치는 영향에 대해 보다 정확한 분석을 위해 사회 경제적 요인을 포함한 다양한 요인들을 포함하여 분석하고 그 결과를 바탕으로 그린벨트의 환경적 효과에 대한 정책적 시사점을 제시하는 것에 의의를 갖는다. 분석에 활용될 데이터의 측면에서 분석 정확도를 높이기 위해 미시적 수준 단계(Micro level)의 데이터를 활용하여 분석한다. 사회 경제적 속성을 위한 수도권을 4만여 개의 구역으로로 나뉜 집계구 데이터를 사용할 것이며, 대기오염의 효과를 보다 정확히 분석하기 위해 120여개의 일일 대기오염 측정소 데이터를 이용하여 수도권 전체의 대기오염 분포를 추정하였다. 대기오염 추정 방법은공간 보간 기법에서 대표적으로 사용되고 있는, 크리깅 보간 기법을 이용하였으며 5가지 대기오염물질 모두 추정하여 각각 분석에 사용하였다. 그리고 추정된 대기오염의 농도를 지수로 변환하여 대기오염 물질별로 서로 다르게 사용되고 있는 측정 단위를 통일하여 사용하였다*. 이는 기존 연구보다 미시적으로 분석이 가능하다는 장점이 있다. 분석 결과를 바탕으로 수도권의 대규모 녹지공간인 그린벨트가 갖는 환경적 의의에 대하여 강조하고, 정책적 시사점 및 대안을 제시 할 수 있는 점에서 차별성을 갖는다.

3. 수도권 대기오염의 분포 추정

3.1 분석개요

본 연구에서 종속변수로 사용되는 수도권 대기오염 데이터는 한국환경공단에서 공식적으로 공개하고 있다.** 한국환경공단에서 공개하고 있는 대기오염물질은 초미세먼지(PM2.5), 미세먼지(PM_{10}), 아황산가스(SO_2), 이산화질소(NO_2), 일산화탄소(CO)와 오존(O_3), 이상 6가지 물질이다. 이 대기오염 물질들은 매 시간마다 수집되어 공개되고 있다. 이중 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 데이터 공개는 비교적 최근에 이루어져 데이터 수집의 한계로 이를 제외한 나머지 5가지 종류의 대기오

* O_3, SO_2, NO_2, CO물질은 모두 ppm단위를 쓰는 반면 PM_{10}은 $\mu g/m^3$의 단위를 사용하고 있다.

** www.airkorea.or.kr 홈페이지

염물질을 분석에 사용하였다.

이러한 대기오염 물질의 농도는 대기오염 측정망이라는 곳에서 측정하여 수집하는데 측정망 종류는 측정소의 위치 및 특성에 따라 도시 대기 측정망, 도로변 대기 측정망, 국가배경농도 측정망, 교외대기 측정망으로 구분된다. 도시 대기 측정망에서는 도시 지역의 평균대기 농도를 측정하고, 도로변 대기 측정망에서는 자동차 통행량과 유동 인구가 많은 도로변 대기 농도를 측정하게 된다. 또한 국가배경농도 측정망에서는 국가적으로 배경농도를 측정하여 외국으로의 유입되는 오염물질과 유출상태 등을 측정한다. 마지막으로 교외대기 측정망에서는 도시를 둘러싸고 있는 교외 지역에서의 배경농도를 측정한다.*. 본 연구에 사용된 대기오염 데이터는 전국대기환경정보 자료 중 연구의 시간적 공간적 범위인 2015년의 수도권에 해당하는 서울, 경기, 인천에 해당하는 측정 지점의 일일 측정 데이터를 사용하였다. 2015년 데이터를 활용한 이유는 대기오염에 영향을 미칠 것으로 예상되는 각 요인들이 2015년 자료로 구축되어 시간적 범위를 일치시키기 위함이다.

3.2 수도권 대기오염 분포 추정

대기오염 측정소 별로 측정된 대기오염물질은 측정소 주변의 대기오염 현황을 반영하지만 측정소가 없는 지역의 대기오염농도를 반영하기에는 한계가 있다. 따라서 측정소와 측정소 사이의 대기오염정보를 예측하여 만들어야 한다. 수도권 대기오염 분포에 대한 공간 예측을 하기 위해서 크리깅이라는 공간 보간 기법을 사용해야 한다. 크리깅 보간 기법은 Matheron(1962)이 광산 기술자 D.G Krige가 광물질의 등급 분포를 예측하는 것을 보고 크리깅 이라고 명명 하였으며, 임의 확률 변수에 대해서 실제 값을 갖고 있는 지점에서 실측값을 이용하여 실측되지 않은 위치에서의 확률 변수에 대한 값을 가중선형 회귀방법으로 예측하는 지구 통계학적 공간예측기법이다(최승배 외, 2008). 이러한 크리깅 보간 기법은 기온 및 강수 분포 추정, 지표 환경의 추정 및 대기오염 분포 추정 등에 많이 사용된다.

본 연구에 적용하면 수도권에 위치하고 있는 120개의 대기오염 측정지점의 대기오염 측정 농도 값을 중심으로 측정 지점이 없어 측정 되지 않은 지역의 대기오염농도를 예측하여 추정하는 것을 말한다. 추정 과정은 먼저 베리오그램을 추정하고, 추정된 베리오그램을 이론적 베리오그램과 비교하여 모형 적합도를 판단한다. 그리고 베리오그램 결과에서 도출된 계수를 이용하여 크리깅 후 우리가 알고자 하는 수도권 전체에 대한 대기오염의 농도 값을 추정하는 단계로 나누어진다. 일반적으로 베리오그램을 추정하는 기본적인 형태는 다음과 같다 :

$$\begin{aligned} &E(Z(s_i)-(Z(s_i))=0 \\ &Var(Z(s_i)-Z(s_i))=2\gamma(h), s_i, s_j \in D \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $Z(s_i)$와 $Z(s_j)$는 각각 미지의 지점에 대한 두 대기오염 관측 지점 s_i와 s_j의 대기오염의 농도값, h는 s_i-s_j, $2\gamma(h)$는 베리오그램, $\gamma(h)$는 세미 베리오그램(semi-variogram)을 의미한다. 보통 세미 베리오그램을 베리오그램으로 정의하기 때문에 대한 베리오그램 형태는 식(1)에 의해 식(2)과 같이 정리 된다.

$$\gamma(h)=\frac{1}{2}E[Z(s_i)-Z(s_j)]^2 \quad (2)$$

즉, 베리오그램은 임의의 두 대기오염 관측소 s_i와 s_j의 측정 농도 값들 사이의 차에 대한 제곱의 평균으로 정의되며, 위의 식으로 계산된 베리오그램을 실험적 베리오그램(Experimental Variogram)이라 한다(최승배 외, 2008).

이론적 베리오그램(Theoretical Variogram)은 데이터의 공간적 상관관계를 이상적으로 표현한 베리오그램이기 때문에 실험적 베리오그램의 경향을 잘 표현하는 모델의 선택이 중요하다. 왜냐하면 베리오그램의 결과가 최종 크리깅 예측 값에 영향을 주기 때문이다. 보통의 세미 베리오그램 모형은 다음과 같은 Gaussian, Exponential, Spherical 이론적 모형을 포함한다(Trauth, 2007).

Gaussian 모형 :

$$\gamma(h)=c \cdot [1-\exp(-\frac{h^2}{a^2})] \quad (3)$$

Spherical 모형 :

$$\gamma(h)=\begin{bmatrix} c \cdot (1.5 \cdot \frac{h}{a}-0.5(\frac{h}{a})^3) & for\ 0 \le h \le a \\ c & for\ 0 > a \end{bmatrix} \quad (4)$$

Exponential 모형 :

$$\gamma(h)=c \cdot [1-\exp(-3 \cdot \frac{h}{a})] \quad (5)$$

여기서 h는 거리, c는 문턱(sill), a는 범위(range)를 의미한다. 거리 h가 가까우면 베리오

* www.airkorea.or.kr 측정망 정보 및 측정소 정보

그램은 0에 가까운 값을 갖지만 멀어지면 베리오그램은 증가하게 된다. 그러나 특정거리 이상 멀어지게 되면 더 이상 증가하지 않고 일정한 거리를 갖게 된다. 이때 베리오그램이 갖는 일정해지는 거리를 범위, 그때의 베리오그램 값을 문턱이라 한다.

Table 2. 이론적 베리오그램 모형과 추정된 베리오그램의 비교

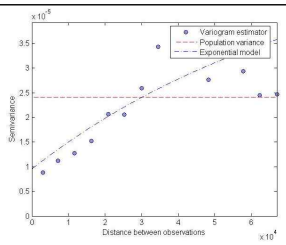
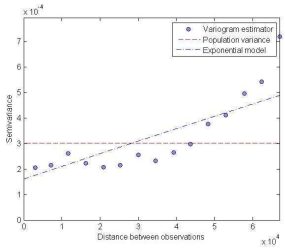
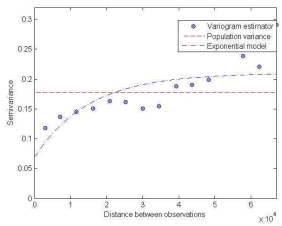
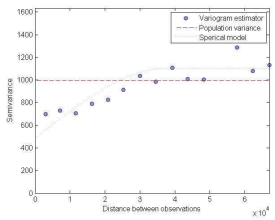
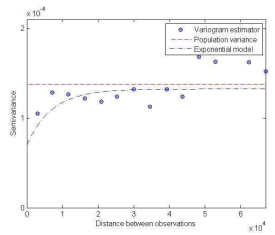
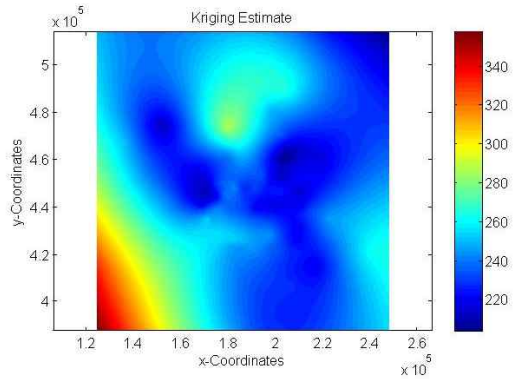
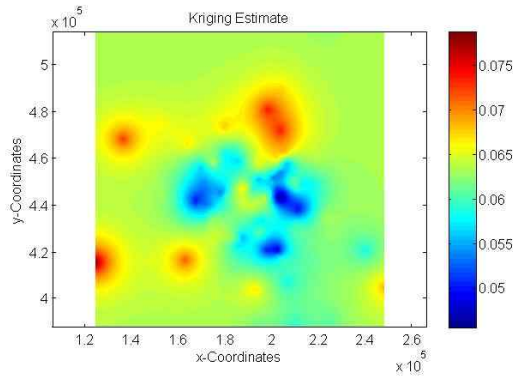
아황산가스 (SO_2)	Nugget	1.E-05	
	Sill	5.E-05	
	Range	237.4	
	이론 베리오그램 모형	Exponential	
이산화질소 (NO_2)	Nugget	2.E-04	
	Sill	7.E-03	
	Range	3888	
	이론 베리오그램 모형	Exponential	
일산화탄소 (CO)	Nugget	0.068	
	Sill	0.142	
	Range	45.192	
	이론 베리오그램 모형	Exponential	
미세먼지 (PM_{10})	Nugget	485.9	
	Sill	619.3	
	Range	38.145	
	이론 베리오그램 모형	Spherical	
오존 (O_3)	Nugget	7.E-05	
	Sill	6.E-05	
	Range	21.262	
	이론 베리오그램 모형	Exponential	

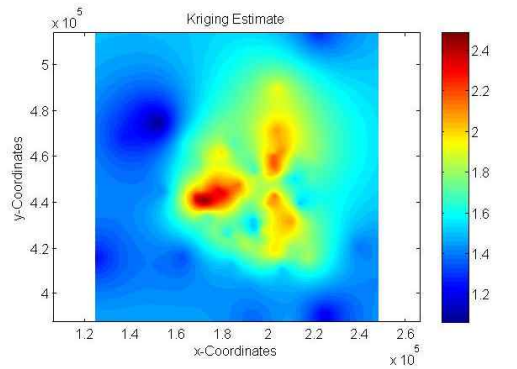
Table 2는 위의 세 가지 모형에 의해 추정된 대기 오염 물질에 대한 이론 베리오그램 모형이다. 아황산가스(SO_2), 이산화질소(NO_2), 일산화질소(CO), 오존(O_3) Exponential 모형을 미세먼지(PM_{10})는 Spherical 모형을 선택하였다. 또한



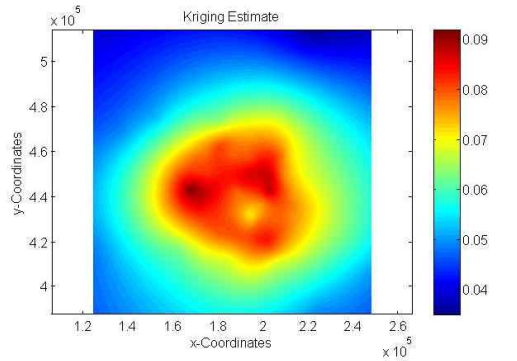
PM_{10}



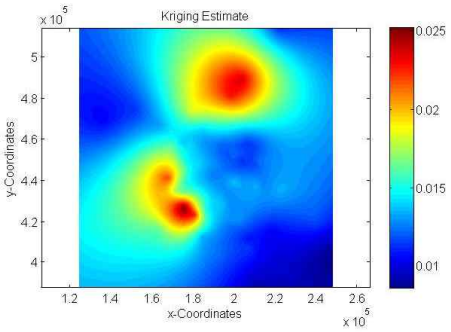
O3



CO



NO_2



SO_2

Figure 1. 수도권 대기오염에 대한 크리깅 추정 결과

Table 2의 오른쪽 그래프는 추정된 수도권 대기오염 데이터를 이용하여 실험적 베리오그램을 분석한 후, 위의 식에서 계산된 이론 베리오그램의 결과와 비교한 그래프이다. 각 오염 물질별로 추정된 베리오그램 그래프는 선택된 모형의 결과에 의해 서로 다르게 나타나며, 각 오염 물질별로 이론 베리오그램과 실험 베리오그램의 차이를 알 수 있다.

이렇게 분석된 각 대기오염물질의 추정치는 통합대기환경지수(CAI: Comprehensive air-quality index)로 환산 한다. 통합대기환경지수는 한국환경공단이 대기오염도 측정치를 국민이 쉽게 알 수 있도록 하고 대기오염으로부터 피해를 예방하기 위한 행동 지침을 국민에게 제시하기 위해 대기오염도에 따른 인체 영향 및 체감오염도를 고려하여 개발한 대기오염도 표현방식*이다. 한국환경공단에서는 다섯 가지 대기오염 물질별로 통합대기환경지수를 계산하여 가장 높은 점수를 통합 지수 값으로 사용하고 있다. 그러나 실제로 우리나라는 PM_{10}의 농도가 이 나머지 네 가지 오염물질에 비해 상대적으로 높다. 따라서 대기오염지수가 PM_{10} 농도에 의해 결정되는 경우가 많고, 나머지 네 가지 오염물질의 농도 수준은 잘 반영되지 않는 경향이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 통합대기환경지수 이외에도 각각의 오염물질에 대해서도 분석을 실시하였다.

4. 수도권의 대규모 녹지공간이 대기오염에 미치는 영향 분석

4.1 기초통계분석

본 연구는 수도권의 대규모 녹지공간인 그린벨트가 대기오염에 미치는 영향을 분석하기 위

Table 3. 대기오염 분석에 대한 변수의 설명

구분			설명	자료출처
종속변수		대기오염물질	대기오염농도지수 - 통합대기오염지수(CAI) - 미세먼지(PM_{10}) 지수 - 일산화탄소(CO) 지수 - 아황산가스(SO_2) 지수 - 이산화질소(NO_2) 지수 - 오존(O_3) 지수	환경부 대기환경정보 (2016)
설명변수	인구요인	인구밀도	집계구별 인구 밀도	통계청(2015)
		고용밀도	집계구별 고용 밀도	
	산업요인	제조업체 종사자수	집계구별 제조업 종사자수	
		발전소 주변지역	화력발전소 반경 5km 포함집계구 더미 (1=발전소주변지역, 0=불포함지역)	한국전력공사 (2015)
	교통요인	교차로 비율	집계구 내 교차로수 비율	국가교통DB 센터(2015)
		도로면적 비율	집계구 내 도로면적 비율	
	도시공간 구조요인	서울지역	서울더미변수(1=서울, 0=그 외)	통계청 시군구 지도(2015)
		서울 주변지역	서울 주변지역 더미변수 (1=Inner Suburbs, 0=그 외)	
		수도권 교외지역	수도권 교외지역 더미변수 (1=Outer Suburbs, 0=그 외)	
	접근성 요인	서해안 접근성	서해안으로부터 거리	KLIS(2014)
		한강 접근성	한강 및 북한강 남한강으로부터 거리	
	그린벨트	그린벨트	그린벨트 면적 비율	

* www.airkorea.or.kr 통합대기환경지수, 통합대기환경지수 환산방법은 홈페이지 참고

해 관련 선행연구에서 사용된 다중회귀모형(Multiple Regression Model)을 이용하였다. 다중회귀모형은 복잡한 다수의 요인을 모형에 포함하여 그 관계를 잘 설명할 수 있는 장점이 있다.

먼저 수도권 그린벨트와 대기오염과의 관계를 분석하기 위해 앞 장과 같이 환경부에서 실시간으로 수집하여 제공하고 있는 다섯가지 대기 오염 물질(SO_2, PM_{10}, O_3, CO, NO_2) 데이터를 수집하였고, 이를 공간보간기법 중 하나인 베리오그램(Variogram)과 크리깅(Kriging) 기법을 이용하여 수도권 대기오염 분포를 추정하였다. 또한 수도권의 사회·경제·물리적 속성이 포함되어 있는 집계구 데이터, KLIS 데이터 등을 이용하여 인구, 산업, 교통, 공간구조, 접근성, 그린벨트 요인을 설명 변수를 선정하였고, 대기오염물질의 분포와 그린벨트를 비롯한 각각의 도시 특성 요인들과의 관계를 규명하기 위해 다중회귀모형을 이용하여 실증분석을 실시하였다.

그린벨트가 대기오염에 미치는 효과를 분석하기 위해 제 2장에서 검토한 이론적 논의 및 관련 선행연구를 토대로 미치는 요인과 설명변수를 선정하였다. 선행연구에서는 미치는 요인을 토지 이용요인, 인구 및 가구요인, 교통요인, 접근성요인, 지형 요인 등을 사용하였다. 그러나 이들 요인을 모두 반영하는 것은 변수의 공선성 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 선행연구에서 사용된 각 요인 중 변수간 공선성이 일어나지 않는 변수와 연구의 차별성을 위해 산업, 도시공간구조 등에 대한 요인을 포함하였다.

따라서 본 연구에서 그린벨트의 대기오염 효과를 분석하기 위해 사용된 종속변수는 수도권 대기오염지수이며, 그에 영향을 미치는 설명변수는 인구요인, 산업요인, 교통요인, 도시공간구조 요인, 접근성요인과 그린벨트 요인으로 구성된다.

Table 4는 그린벨트가 대기오염에 미치는 영향에 대한 분석 모형에 사용된 종속 및 설명 변수의 기초 통계량을 나타내고 있다. 다섯 가지 대기오염물질은 통합대기환경지수추정의 지수표를 이용하여 지수화 하여 각 오염물질의 정도를 같은 수준(level)의 수준으로 맞추었으며, 종속변수로 사용되는 다섯 가지 오염물질과 통합대기환경지수에 대해서 모두 자연 로그로 변환하여 분석하였다. 이는 분석결과의 해석에서 변수의 단위의 변화에 따른 대기오염 농도지수의 변화율을 보기 위함이다.

통합대기환경지수는 평균 326.2으로 225.4와 421.26사이에 분포되어 있다. 다섯 가지 대기오염물질 중 미세먼지(PM_{10})는 평균 276.56ppm으로 가장 높은 오염 수준을 나타내고 있다 반면, 아황산가스(SO_2)가 평균 33.6으로 가장 낮은 수치를 갖고 있다. 인구 요인에서는 인구 밀도와 고용 밀도가 집계구별 각각 평균 0.05인/㎡, 0.004인/㎡로 나타났다. 산업요인에서 제조업 종사자수는 집계구별 0명에서 최대 26,128명이 종사하고 있는 것으로 나타났으며, 화력 발전소 주변지역은 전체 집계구 중 9%에 해당하는 지역으로 나타났다. 교통요인을 살펴보면 집계구 내 교차

Table 4. 대기오염에 미치는 영향 분석에 대한 변수 기초 통계량

구분		평균 (Mean)	표준편차 (Standard deviation)	최소값 (Min)	최대값 (Max)
종속 변수	CAI (통합대기오염지수)	326.20	24.96	225.24	421.26
	PM_{10}(지수)	276.56	24.01	187.50	372.09
	O_3(지수)	74.57	17.26	0	164.67
	CO(지수)	46.05	7.31	0	64.25
	NO_2(지수)	110.04	4.52	75.97	126.19
	SO_2(지수)	33.60	6.24	20.10	72.78
인구요인	인구밀도(인/㎡)	0.05	0.04	0	3.52
	고용밀도(인/㎡)	4.E-03	9.E-03	0.E+00	2.E-01
산업요인	제조업체 종사자수(인)	34	369.48	0	26128
	발전소 주변지역	0.09	0.28	0	1
교통요인	교차로 비율	1.E-05	4.E-05	0	9.E-04
	도로면적 비율	0.05	0.09	0	1.29
도시공간 구조요인	서울지역	0.40	0.49	0	1
	서울 주변지역	0.44	0.50	0	1
	수도권 교외지역	0.16	0.37	0	1
접근성 요인	서해안접근성(m)	22218.96	12703.89	16.12	118217.33
	한강접근성(m)	12396.72	11444.20	0	129440.85
그린 벨트	그린벨트비율	0.02	0.13	0	1
N		41427			

Table 5. 대기오염에 미치는 영향 분석 결과

Variable		LN_CAI			LN_PM_{10}			LN_O_3			LN_CO			LN_SO_2			LN_NO_2		
		β	t-value	VIF	β	t-value	VIF	β	t-value	VIF	β	t-value	VIF	β	t-value	VIF	β	t-value	VIF
Intercept		5.872	4798.00 ***	0	5.696	4082.76 ***	0	4.305	990.73 ***	0	3.876	1046.51 ***	0	3.747	1606.36 ***	0	4.742	10959.20 ***	0
인구 요인	인구 밀도	-0.050	-6.11 ***	1.10	-0.072	-7.76 ***	1.10	0.025	0.87	1.10	0.176	7.08 ***	1.10	-0.106	-6.81 ***	1.10	0.004	1.23	1.10
	고용 밀도	-0.038	-0.95	1.10	0.068	1.49	1.10	-2.236	-15.76 ***	1.10	0.446	3.69 ***	1.10	-0.553	-7.27 ***	1.10	0.145	10.24 ***	1.10
산업 요인	제조업체 종사자수	0.001	0.42	1.02	-0.001	-0.28	1.02	0.001	1.91 *	1.02	-0.000	-1.90 *	1.02	0.001	6.59 ***	1.02	0.000	-0.83	1.02
	발전소 주변지역	0.006	4.51 ***	1.05	0.004	2.56 *	1.05	-0.051	-11.75 ***	1.05	0.010	2.67 **	1.05	0.001	0.34	1.05	0.010	22.99 ***	1.05
교통 요인	교차로 비율	-18.258	-2.08 *	1.02	-33.647	-3.37 ***	1.02	99.347	3.19 **	1.02	28.777	1.08	1.02	166.093	9.94 ***	1.02	-8.196	-2.64 **	1.02
	도로면적 비율	-0.013	-5.41 ***	1.06	-0.018	-6.88 ***	1.06	-0.044	-5.26 ***	1.06	0.080	11.24 ***	1.06	0.007	1.61	1.06	0.004	5.26 ***	1.06
도시 공간 구조 요인 ****	서울 지역	-0.071	-75.43 ***	1.83	-0.072	-67.54 ***	1.83	-0.032	-9.57 ***	1.83	0.005	1.66 *	1.83	-0.119	-66.48 ***	1.83	0.014	41.65 ***	1.83
	수도권 교외지역	0.013	10.88 ***	1.65	0.035	26.18 ***	1.65	0.179	42.53 ***	1.65	-0.138	-38.31 ***	1.65	0.029	12.72 ***	1.65	-0.054	-128.24 ***	1.65
접근성 요인	서해안 접근성	-9.59E-07	-29.14 ***	1.53	-1.1E-06	-28.06 ***	1.53	5.76E-07	4.93 ***	1.53	-2.1E-06	-20.85 ***	1.53	-6.7E-06	-106.32 ***	1.53	-1.2E-06	-106.23 ***	1.53
	한강 접근성	-2.9E-06	-73.10 ***	1.82	-2E-06	-43.01 ***	1.82	-2.8E-06	-19.62 ***	1.82	-1.7E-06	-13.85 ***	1.82	-4.3E-06	-56.93 ***	1.82	-1.1E-06	-78.15 ***	1.82
그린 벨트	그린벨트 비율	-0.004	-1.34	1.06	-0.013	-4.30 ***	1.06	0.008	0.80	1.06	-0.015	-1.78 *	1.06	-0.009	-1.68 *	1.06	-0.001	-0.28	1.06
R-Square				0.1962			0.1791			0.0830			0.1121			0.3865			0.6745
Adj R-Square				0.1960			0.1789			0.0827			0.1119			0.3863			0.6744
F value				919.09***			821.54***			340.64***			475.55***			2371.56***			7802.83***

*p<0.1 **p<0.05, ***p<0.01, **** : 서울 주변지역을 참조 변수함

로수의 비율이 평균 0.001%, 집계구 면적에서 도로가 차지하는 비율이 5%로 나타났다. 또한 접근성 요인인 한강과 서해안으로부터의 거리는 각각 평균 12km와 22km로 나타났다. 마지막으로 수도권 지역 중 그린벨트에 해당하는 집계구 면적의 비율은 전체 집계구에서 약 2%에 해당하는 것으로 나타났다.

4.2 분석 결과

그린벨트 및 도시의 특성이 대기오염에 미치는 영향과 같은 대부분의 인과 관계 구조의 분석은 여러가지 요인들로 복잡하게 얽혀있기 때문에 다수의 독립변수를 모형에 포함시키는 다중회귀분석이 불가피해진다. 따라서 본 모형은 그린벨트 및 도시 특성과 대기오염과의 관계를 가장 잘 설명할 수 있다.

모형에서 사용된 변수는 다중회귀분석에서 가장 많이 사용하고 있는 단계적 회귀분석방법(Stepwise regression method)으로 결정하였다. 이 방법은 변수 간에서 발생하는 다중공선성(Multicollinearity) 문제를 해결할 수 있는 장점이 있어 기존의 도시의 특성 및 그린벨트와 대기오염의 관계를 다루는 연구에서 대부분 사용되었다. 본 연구의 사용된 모형은 다음의 식과 같다.

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + e \quad (6)$$

여기서 Y_i는 종속변수인 통합대기오염지수, 미세먼지(PM_{10}), 아황산가스(SO_2), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO_2), 오존(O_3)농도의 지수, α는 상수항, β는 수도권 인구 요인, 산업 요인, 교통 요인, 도시공간구조 요인, 접근성 요인, 그린벨트 요인의 계수 벡터를 뜻한다. X_i는 설명변수 각 요인에 대한 변수 행렬이며 e는 오차항을 의미한다. 앞서 언급하였듯이 본 연구에서는 대기오염 지수에 자연로그를 취한 값을 종속변수로 사용하였는데, 이는 분석결과에서 변수 단위의 변화대비 대기오염지수의 변화율을 보기 위해서 이다.

Table 5는 각 오염 물질에 대한 회귀분석 결과를 제시하고 있다. CAI, PM_{10}, O_3, CO, SO_2, NO_2 의 설명력은 각각 0.20, 0.18, 0.08, 0.11, 0.39 그리고 0.67로 각각 분석 되어 각 모형의

설명력은 비교적 낮은 편이다. 그러나 F 검정 결과 모든 모형은 1% 수준에서 모두 유의하여 본 다중회귀분석 모형에 대한 적합성은 유의하다고 볼 수 있다.

분석결과 먼저 인구 요인과 대기오염과의 관계를 살펴보면 NO_2와 CO는 인구밀도와 정(+)의 관계에 있어 인구밀도가 늘어날수록 CO와 NO_2 지수가 증가하는 것으로 분석 되었다. 특히 인구밀도가 1단위 늘어날수록 CO 지수가 17% 증가하는 것으로 나타나 CO의 대기 오염 수준과 인구 밀도 간에 높은 연관이 있는 것으로 분석되었다. 고용 밀도의 경우도 인구 밀도와 마찬가지로 CO와 NO_2 지수의 대기오염 수준과 통계적으로 유의한 정(+)의 관계로 고용밀도가 단위면적당 1명 늘어남에 따라 각각 평균 농도에 비해 44.6%, 14.5% 증가하는 것으로 나타나 선행연구들과 같이 인구 밀도 및 고용 밀도가 이들 대기오염 물질을 높이는데 기여하는 것으로 나타났다. 그러나 CAI, PM_{10}, O_3 은 인구요인과 대부분 통계적으로 유의미한 부(-)의 관계가 있거나 무의미한 것으로 나타났다.

산업요인 중 제조업 종사자수는 대기오염물질 중 O_3과 SO_2가 통계적으로 유의한 정(+)의 관계로 대기오염지수 증가에 기여하는 것으로 분석되었다. 특히 SO_2는 제조업체에서 발생하는 대기오염물질과 관련이 있으며, 실제 회귀분석 결과에서도 제조업체 종사자 수가 한 명 증가할 때마다 SO_2지수는 0.1% 증가하여 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 발전소 주변지역 더미는 CAI, PM_{10}, CO, NO_2가 통계적 유의성을 갖고 증가하는 것으로 분석되었다. 이 중 NO_2 는 고온의 공정에서 많이 발생하는 물질로, 주로 발전소 주변지역에서 NO_2의 평균 농도가 1% 증가하는 것으로 나타났다.

교통요인 중 교차로 비율은 O_3, SO_2에서 통계적으로 유의한 정(+)의 관계로 분석되었다. 이러한 결과는 교차로수가 많을수록 차량이 정차하고 있는 시간이 길며, 이것은 배출되는 대기오염물질이 많아지는 것을 의미한다고 볼 수 있다. SO_2는 주로 디젤 엔진을 갖고 있는 자동차 등에서 많이 발생하는데, 집계구내 교차로 비율이 1% 늘어날수록 SO_2지수는 166.09% 증가하여 많은 영향을 미치는 것으로 분석 되었다. 도로 면적 비율의 경우 면적이 클수록 차가 많이 다니며 도로 용량이 큰 것으로 가정하였을 때, CO와 NO_2 물질에서 통계적의로 유의성을 갖는 정(+)의 관계가 나타났다. CO와 NO_2 역시 자동차에서 나오는 배기가스에 주요 물질이며, 집계구내 도로 면적 비율이 1% 증가할수록 각각 8%, 0.4% 증가하는 것으로 나타나 교차로수와 도로 면적은 각각 이러한 대기오염물질 농도를 높이는데 기여하고 있는 것으로 분석되었다.

도시공간구조 요인의 경우를 살펴보면, CAI, PM_{10}, O_3 및 SO_2의 경우, 서울 지역보다 서울 주변지역에서, 서울 주변지역보다 수도권 교외지역에서 더 높은 대기오염 지수를 갖는 것으로 나타났다. 이는 수도권 교외지역으로 갈수록 이들 오염물질이 높게 분포하는 것을 알 수 있다. CAI의 경우 다섯 가지 대기오염 물질 중 PM_{10}의 영향을 가장 많이 받고 있기 때문에 CAI의 패턴이 PM_{10}의 패턴을 따라가는 경향이 있다. 따라서 PM_{10}의 결과와 CAI의 결과가 유사한 결과가 나타났다.

접근성 요인 중 서해안으로부터 거리에 대한 분석 결과를 살펴보면 PM_{10}, CO, SO_2와 NO_2는 통계적으로 유의미한 부(-)의 값을 가지는 것으로 분석되어 서해안에 가까워질수록 각각의 대기오염지수가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 서해안 쪽에 제조업, 발전소 등의 오염 배출원들이 집중되어 있고, 또 중국과의 근접성 때문인 것으로 판단된다. 서해안과 가까울수록 CAI, PM_{10}, CO, SO_2와 NO_2 물질은 각각의 평균 농도의 0.0002%, 0.0001%, 0.0002%, 0.0007%, 0.0001%, 증가하는 것으로 나타났다. 또한 한강으로부터 거리에 대한 변수도 모든 오염 물질에 대해 통계적으로 유의한 부(-)의 결과를 갖는 것으로 나타나 한강에 가까울수록 각각의 대기오염지수가 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과는 한강이 서울을 가로질러 통과하여 중심도시와 교외지역의 대기오염수준이 열악하다는 것을 보여주는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 접근성 요인의 경우 다른 요인에 비해 계수의 크기가 작아 그 영향은 상대적으로 작다고 볼 수 있다.

본 연구의 관심사인 그린벨트의 경우 집계구내 면적의 비율이 높은 집계구 일수록 PM_{10}과 CO, SO_2의 농도가 통계적으로 유의미하게 1.3%, 1.5%, 0.1% 낮은 것으로 나타났다. CAI와 NO_2의 경우 그린벨트 지역의 비율이 높은 집계구일수록 농도가 낮게 나타나는 것으로 분석되었으나 통계적으로 유의미하지 않았다. O_3의 경우 그린벨트지역의 농도가 통계적으로 무의미하지만 0.8% 높은 것으로 나타났다. 선행 연구에서 녹지지역에서 주로 PM_{10}, NO_2, SO_2의 농도가 낮은 것으로 나타난 결과와 유사하게 나타났다. 다만 NO_2 농도의 경우 선행연구에서는 녹지 지역의 농도가 낮은 것으로 나타났지만 본 연구에서는 교통요인이나 토지 피복 이외에 사회경제적 요인들을 포함하여 분석을 실시하였기 때문에 다른 결과가 나타났다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 2015년의 수도권 대기오염 측정소의 일일 데이터를 이용하여 통합대기환경지수와 다섯 가지 대기오염물질인 미세먼지(PM_{10}), 아황산가스(SO_2), 일산화탄소(Co), 이산화질소(NO_2), 오존(O_3)의 수도권 대기오염 분포를 크리깅 공간보간 분석 기법을 이용하여 추정하고, 이를 이용하여 도시 특성과 그린벨트가 대기오염에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 주요 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 인구 요인인 인구밀도와 고용밀도는 CO와 NO_2지수를 증가시키는 원인이 되는 것으로 나타나 인구밀도와 고용밀도가 높은 곳에서 이들 대기오염 물질로 건강에 위협될 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

둘째, 산업요인인 제조업체 종사자수는 O_3과 SO_2가 통계적 유의성을 갖고 각각의 대기오염지수에 통계적으로 유의미한 정(+)의 관계로 분석되어 대기오염지수 증가에 기여하는 것으로 분석되었고, 발전소 주변지역 또한 PM_{10}, CO, NO_2가 통계적으로 유의하게 정(+)의 관계로 농도가 높은 것으로 분석되었다.

셋째, 교통요인 중 교차로 비율은 O_3, SO_2가 통계적으로 유의한 정(+)의 관계, 도로 면적 비율은 CO와 NO_2 물질이 통계적으로 유의미한 정(+)의 관계가 나타나 대기오염물질 증가에 기여하는 것으로 나타났다.

넷째, 도시공간구조 요인은 도시 내 대기오염 수준에 영향을 미치는 중요한 요인으로 파악되었다. 흥미롭게 나타난 사실은 PM_{10}, O_3 과 SO_2는, 수도권의 중심 도시인 서울에서 수도권 교외지역으로 갈수록 더 높은 대기오염 지수를 갖는 것으로 나타났지만, CO와 NO2는 서울 지역 일수록 대기오염 지수가 더 높아지는 경향을 가지는 것으로 분석되었다. 이는 PM_{10}, O_3 과 SO_2 농도에 영향을 주는 서해안에 밀집된 제조업체, 발전소, 교외지역의 비산먼지 등이 주 원인으로 판단되며, 자동차에서 주로 발생 되는 물질인 CO와 NO_2는 주로 서울 지역 및 서울 주변지역의 교통 밀집과 관련이 있다고 판단된다.

다섯째, 접근성 요인인 서해안으로부터 거리와 한강으로부터 거리 모두 O3를 제외한 물질 모두 통계적으로 유의미한 부(-)의 값을 가지는 것으로 분석되어 서해안과 한강에 가까워질수록 위의 물질에 대한 대기오염지수가 높은 것으로 나타났다.

마지막으로, 본 연구의 관심사인 그린벨트의 경우 집계구 내 면적의 비율이 높은 집계구 일수록 PM_{10}과 CO, SO_2의 농도가 낮은 것으로 나타났다. CAI와 NO_2의 경우 그린벨트 지역의 비율이 높은 집계구일수록 농도가 낮게 나타나는 것으로 분석되었으나 통계적으로 유의미하지 않았다. O_3의 경우 그린벨트 지역의 농도가 통계적으로 무의미하지만 높은 것으로 나타났다. 선행연구에 주로 PM_{10}, NO_2, SO_2의 농도가 녹지 지역에서 낮은 것으로 나타난 결과와 유사하게 나타났다.

본 장에서의 그린벨트가 대기오염에 미치는 영향에 대한 분석 결과는 도시의 개발과 그린벨트 및 대기 환경 분야의 정책 입안 및 집행 시 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

첫째, 본 연구의 분석결과는 도시의 특성이 대기오염 물질별로 서로 다른 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 대기 환경 정책의 근본적인 목표는 도시민이 대기 환경오염으로부터 건강적인 위험을 감소시키고 삶의 질을 증가시키는 것이기에 대기오염 수준을 측정하는 측정소의 공간적 배치와 대기오염 측정 물질의 종류를 결정할 때, 도시 공간의 특성이 고려되어야 할 것이다. 특히 수도권의 인구는 대한민국 인구의 약 절반인 2천5백만명의 인구가 거주하고 있다. 그러나 이에 비해 수도권의 대기오염 측정소는 약 120여개 지점에만 설치되어있다. 따라서 수도권 도시민들이 공간적으로 정확한 대기오염 정보를 획득 할 수 있도록 도시 공간구조 및 개발의 패턴, 인구 분포 등을 고려하여 대기오염 측정소를 확대적으로 추가 설치할 필요가 있다.

둘째, 본 연구의 분석 결과로 제시된 인구와 고용밀도가 높은 서울 및 수도권 주변 지역, 교차로 및 도로 인접지역, 제조업체(공장) 및 발전소 인접 지역 등에서 높은 대기오염지수를 나타내고 있다. 또한 대기오염의 분포는 대기오염 물질별로 수도권 내에서 동일하게 나타나지 않고 공간 분포가 다르게 나타난다. 따라서 대기오염물질 저감 대책을 세울 때 큰 정책의 큰 틀안에 대기오염물질 별 공간특성과 지역적 분포를 고려하여 지역 특수성이 반영된 대기 환경정책이 입안되어야 하고 집행될 필요가 있다.

셋째, 같은 대기 오염 수준에도 도시민의 인구학적 특성에 따라 주거나 직장 입지는 대기오염 위험 노출이 서로 상이하기 때문에 이에 대한 대응책을 마련해야 할 것이다. 주거 입지는 여러 가지 요인에 의해 결정 되지만 가구의 경제적인 부분도 하나의 결정요인 이라 볼 수 있어 저소득층은 중산층이나 고소득층보다 환경적으로 열악한 지역에서 생활할 가능성이 높다. 따라서 수도권의 저소득층 거주 밀집 지역에서의 대기오염 수준을 정확히 분석하고 평가하여 환경적 불평등을 해소하기 위한 정책적 대안을 마

련해야 할 것이다.

넷째, 수도권 중심 지역의 대기오염을 감소시키기 위한 도시 정책이 필요하다. 본 연구의 결과에서 한강에 가까울수록 모든 대기오염물질의 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 한강은 수도권의 중심부에 위치하고 있으며 서울의 중심지를 가로 지르는 위치에 있기도 하다. 이러한 분석 결과가 나타나는 원인은 대기오염의 원인이 되는 인구, 산업, 교통요인들이 수도권 중심부에 밀집되어 있기 때문이다. 따라서 고밀화된 수도권 중심부의 대기오염 농도를 낮출 수 있는 정책들이 마련되어야 한다.

다섯째, 그린벨트 지역에서 대기오염 물질 중 PM_{10}, NO_2, SO_2의 대기오염 농도가 낮은 것으로 나타났다. 실제로 그린벨트 지역에서 위의 대기오염물질을 흡수하는 기능이 있는지에 대해서는 본 분석 결과로 명확하게 알 수 없지만, 그린벨트 지역에서 대기오염 물질의 농도가 낮게 나타나는 것은 간접적으로 그린벨트 지역에서 환경적 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 그린벨트 지역에서 생태계 환경 조성과 수도권 시민들의 여가 및 레크리에이션 장소 등으로 활용하기에 유리하다. 또한 그린벨트 내 생태적으로 우수한 지역에 대하여 기존의 수도권 생태축과 연계하여 보다 다양한 생태계가 유지 될 수 있도록 정책적 대안이 필요하다.

REFERENCES

권용우, 변병설, 이재준, 박지희. (2013). 그린벨트: 개발제한구역 연구, 박영사

김소정, 박혜령, 이종선. (2020), 지각된 대기오염이 부정 정서, 신체증상 및 미래 조망에 미치는 영향, 한국융합학회논문지, 11(10), pp. 287-298.

최승배, 문승호, 강창완, 조장식, 이정형, (2008). 「SAS/STAT를 이용한 공간예측」, 자유아카데미.

환경부(2020), 2019 대기환경연보. 국립환경과학원

Aguilera, I., Sunyer, J., Fernandez-Patier, R., Hoek, G., Aguirre-Alfaro, A., Meliefste, K., Bomboi-Mingarro, M.T., Nieuwenhuijsen, M.J., Herce-Garraleta, D. & Brunekreef, B. (2008). Estimation of outdoor NOx, NO2, and BTEX Exposure in a Cohort of Pregnant Women Using Land Use Regression Modeling. Environmental Science & Technology. 42: 815-821.

Amini, H., Seyed, M., Sarah, T., Henderson, B., Naddafi, K., Nabizadeh, R. & Yunesian, M. (2014). Land Use Regression Models to Estimate the Annual and Seasonal Spatial Variability of Sulfur Dioxide and Particulate Matter in Tehran. Iran Science of the Total Environment (488-489): 343-353.

Bengston, D. & Youn, Y.C. (2006). Urban Containment Policies and the Protection of Natural Areas: The Case of Seoul's Greenbelt. Ecology and Society. 11(1): 3.

Briggs, D., Collins, S., Elliot, P., Fischer, P., Kingham, S., Lebret, E., Pryl, K., Hv, Reeuwijk, Smallborne, K., & Avd, Veen, (1997). Mapping Urban Air Pollution Using GIS: A Regression-based Approach. International Journal of Geographical Information Science. 11: 699-718.

Cho, H.S. & Choi, M.J. (2014). Effects of Compact Urban Development on Air Pollution: Empirical Evidence from Korea. Sustainability. 6: 5968-5982.

Dirgawatia, M., Barnesa, R., Wheeler, A.J., Arnolda, A.L., McCaul, K.A., Stuart, A.L., Blake, D., Hinwood, A., Yeape, B., & Heyworth, J.A. (2015). Development of Land Use Regression Models for Predicting Exposure to NO2 and NOx in Metropolitan Perth, Western Australia. Environmental Modelling & Software. 18: 1-10.

Gilbert, N. L., Goldberg, M. S., Beckerman, B., Brook, J. R., & Jerrett, M., (2005). Assessing Spatial Variability of Ambient Nitrogen Dioxide in Montreal, Canada, with a Land-Use Regression Model. Journal of the Air & Waste Management Association. 55(8): 1059-1063.

Henderson, S., Beckerman, B., Jerrett, M., & Brauer, M., (2007). Application of Land Use Regression to Estimate Long-Term Concentrations of Trafficrelated Nitrogen Oxides and Fine Particulate Matter. Environmental Science & Technology. 41: 2422-2428.

Ho, C.C., Chan, C.C., Cho, C.W,, Lin, H.I., Lee, J.H., & Wu, C.F. (2015). Land Use Regression Modeling with Vertical Distribution Measurements for Fine Particulate Matter and Elements in an Urban Area. Science of The Total Environment. 536: 150-160.

Jerrett, M., Arain, M.A., Kanaroglou, P., Beckerman, B., Crouse, D.,Gilbert, D., Brook, J.R., Finkelstein, N., & Finkelstein, M.M., (2007). Modeling the Intraurban Variability of Ambient Traffic Pollution in Toronto, Canada. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A. 70: 200-212.

Jerrett, M., Arain, M.A., Kanaroglou, P., Beckerman, B., Crouse, D.,Gilbert, D., Brook, J.R., Finkelstein, N., & Finkelstein, M.M., (2007). Modeling the Intraurban Variability of Ambient Traffic Pollution in Toronto, Canada. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A. 70: 200-212.

Kerckhoffs, J., Wang, M., Meliefste, K., Malmqvist, E., Fischer, P., Janssen, N.A., Beelen, R., & Hoek, G. (2015). A National Fine Spatial Scale Land-Use Regression Model for Ozone. Environmental Research. 140: 440-448.

Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999a). Major Accidents in Process Industries and an Analysis of their Causes and Consequences. Journal of Loss Prevention in Process Industries. 12: 361-378.

Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999b). The Worst Chemical Industry Accident of 1990s - What Happened and What Might have been: A Quantitative Study. Process Safety Progress. 18: 135-145.

Lee, J.H., Wu, C., Hoek, G., Hoogh, K., Beelen, R., Brunekreef, B. & Chan, C. (2015). LUR Models for Particulate Matters in the Taipei Metropolis with High Densities of Roads and Strong Activities of Industry, Commerce and Construction. Science of the Total Environment. (514): 178-184.

Li, X., Liu, W., Chen, Z., Zeng, G., Hu, C., León, T., Liang, J., Huang, G., Gao, Z., Li, Z., Yan, W., He, X., Lai, M., & He, Y. (2015). The Application of Semicircular-Buffer-Based Land Use Regression Models Incorporating Wind Direction in Predicting Quarterly NO2 and PM10 Concentrations. Atmospheric Environment. 103: 18-24.

Madsen, C., Lodrup-Carlsen, K.C., Hoek, G., Oftedal, B., Nafstad, P.,Meliefste, K., Jacobsen, R., Nystad, W., Carlsen, K.H.,& Brunekreef, B.,(2007). Modeling the Intra-Urban Variability of Outdoor Traffic Pollution in Oslo, Norway - A GA2LEN project. Atmospheric Environment. 41: 7500-7511.

Matheron, G., (1962), Trait' e de g' ostatistique appliqu' ee, Tome I: M' moires du Bureau de Recherches G' ologiques et Mini'eres, no.14. Paris: Technip Press.

Meng, X., Chen, L., Cai, J., Zou, B., Wu, C.F. & Fu, Q. (2015). A Land Use Regression Model for Estimating the NO2 Concentration in Shanghai, China. Environmental Research. 137: 308-315.

Montagne, D. R., Hoek, G., Klompmaker, J.O., Wang, M, Meliefste, K & Brunekreef, B. (2015). Land Use Regression Models for Ultrafine Particles and Black Carbon Based on Short-Term Monitoring Predict Past Spatial Variation. Environmental Science & Technology. 49: 8712-8720.

Nowak, D.J. & Dwyer, J.F. (2007). Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. Urban and Community Forestry in the Northeast. Springer Netherlands: 25-46.

OECD. (2012). Green Growth and Developing Countries: Consultation Draft. Paris: OECD.

Wheeler, A., Smith, M., Xu, X., Gilberta, N., & Brook, J. (2008). Intra-Urban Variability of Air Pollution in Windsor, Ontario-Measurement and Modeling for Human Exposure Assessment. Environmental Research. 106: 7-16.

Yang, J., McBride, J., Zhou, J. & Sun, Z. (2005). The Urban Forest in Beijing and its Role in Air Pollution Reduction. Urban Forestry & Urban Greening. 3: 65-78.

논문투고일 2020년 11월 18일
논문심사일 2020년 12월 07일
논문게재일 2020년 12월 30일