

# 도시 특성과 대기 오염 수준과의 관계 분석 연구\*

- 수도권을 사례로 -

## Analysis on Relationship between Urban Development Characteristics And Air Pollution level

- A Case of Seoul Metropolitan Region -

김희재\*\* · 전명진\*\*\*  
Hee-Jae, Kim · Myung-Jin, Jun

### Abstract

This study aimed to analyze the relationships between urban development patterns and air pollution level for the five pollutants (PM10, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) in the Seoul metropolitan area (SMA) using multiple regression models. We used Kriging methods to interpolate air pollution levels for the areas which are not covered by the 120 air pollution check stations. The analysis results can be summarized as follows. First, population and employment densities are positively related to CAI(Comprehensive air-quality index) values for CO and NO<sub>2</sub> with a high statistical significance. Second, manufacturing industry has contributed to increasing CAI levels of O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub>, while areas surrounding thermal power plants have relatively higher levels of PM10, CO, and NO<sub>2</sub>. Third, number of intersections is positively related to CAI levels of O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub>, while the higher proportion of road area in a zone has contributed to rising CAI levels of CO and NO<sub>2</sub>. Fourth, it is interesting to find that the CAI levels of PM10, O<sub>3</sub>, and SO<sub>2</sub> are more likely to increase in the suburban areas than in the central city, but those of CO and NO<sub>2</sub> tend to rise in the central city. Finally, the CAI levels of PM10, CO, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>2</sub> are likely to be high along the west coast of the SMA(Seoul metropolitan area), possibly due to the high concentration of manufacturing industry and proximity to China.

키 워 드 ▪ 도시개발 패턴, 베리오그램, 크리깅, 대기오염  
Keywords ▪ Urban Development Pattern, Variogram, Kriging, Air Pollution

## I. 서 론

### 1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 지난 40년 동안 급속한 경제 성장의

과정에서 에너지 소비가 급증하고 이로 인한 온실 가스 배출 및 대기오염 악화 문제를 겪고 있다. 우리나라의 온실가스 배출량은 1990-2005년 사이에 두 배로 증가하여 OECD 국가 중 가장 높은 증가율을 기록했다(OECD, 2012). 또한 급격히 늘어난

\* 본 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2010-0029445)

\*\* 중앙대학교 도시계획·부동산학과 박사수료(주저자 : irex1@naver.com)

\*\*\* 중앙대학교 도시계획·부동산학과 교수(교신저자 : mjjun1@cau.ac.kr)

에너지 사용으로 인해 대기오염이 증가하였는데 통계청에 따르면 1999년에서 2007년 사이 전체 대기 오염 물질이 6.4% 증가하였고 같은 기간 질소 산화물 (NOx)은 19.9% 증가하였다 (통계청, 2011).

수도권 지역은 인구 및 산업, 교통 등 기반 시설이 집중되어 있기 때문에 가장 심각한 대기오염 문제를 겪고 있다. 수도권은 전국에서 발생하는 대기 오염 물질의 1/3이 집중되어 있는데 이는 인구 비율에 비해서는 낮지만 대기오염 물질이 도시 지역에 집중되어 있기 때문에 도시민의 건강에 심각한 위협이 되고 있다. 특히 서울시의 ㎥당 대기오염물질 발생량은 전국 평균의 18배에 이르는 것으로 나타나 대기오염 문제가 심각한 수준임을 알 수 있다 (OECD, 2012). 2008년 기준으로 서울은 WHO 권고 기준 미세먼지 농도는 약 2.5배, 이산화질소 (NO2)는 약 2배 더 높은 것으로 나타나 미국과 유럽의 도시들보다 훨씬 심각한 대기오염 문제를 겪고 있다. (Jun, 2010).

우리나라 환경부에서 공식적으로 발표되는 대기 오염물질은 PM10, O3, SO2, NO2, CO 등 다섯 가지로, 이 물질들은 인체에 기관지관련 질환, 폐질환, 폐암 등 심각한 영향을 미친다. 이러한 대기오염 물질을 측정하는 측정소는 수도권에 2010년 기준으로 약 120여개에 불과해 수도권 주민들이 근린 지역의 정확한 대기오염 수준을 파악하기 어렵다. 또한 대기오염 수준은 인구 규모나 밀도, 토지이용 패턴, 지형, 풍향, 기후 등 매우 다양한 요소에 영향을 받기 때문에 정확한 대기 오염 수준을 파악하기 위해서는 대기오염 수준에 영향을 미치는 요소들에 대한 면밀한 분석이 필요하다.

본 연구는 수도권을 대상으로 대기오염 관측지점을 중심으로 공간 예측 기법 중 하나인 크리깅 (Kriging) 보간 기법을 이용하여 수도권 전체의 대기오염 정도를 추정하여, 대기오염 물질 별 오염 수준과 도시 개발 패턴 간의 관계를 분석 하는 것

을 목적으로 한다. 본 연구는 대기 오염 분포 및 공간 예측 기법과 관련된 국내외 선행연구, 수도권 대기오염 물질의 공간적 분포, 수도권 대기오염 분포의 추정 및 해석, 도시 개발 패턴이 대기오염에 미치는 영향 분석, 그리고 결론 및 정책적 시사점 등 크게 5 부분으로 구성된다.

## II. 선행연구 검토

본 연구의 목적이 도시 개발 특성과 대기오염 수준간의 관계를 분석하는 것이기 때문에 선행 연구도 이 주제와 관련된 국내외 선행연구를 중심으로 검토한다. 또한 본 연구에서는 대기오염 측정소가 없는 지역의 대기오염 수준에 대해 공간통계기법을 활용하여 추정하기 때문에 대기오염 공간예측 분석과 관련된 방법론에 대한 선행연구도 포함하여 논의한다.

### 1. 도시 특성이 대기오염에 미치는 영향에 관한 선행연구

일반적으로 도시의 여러 가지 요인 중 도시 공간 구조나 사회 경제적인 요인이 대기오염에 미치는 영향에 관련된 연구는 비교적 활발히 이루어 졌다. Zev 외(2006)는 미국 남부 캘리포니아의 샌디에이고를 대상으로 NO2의 분포를 예측하였다. 교통량, 도로 길이, 공장용지면적, 주택 수, 인구 수 등의 교통, 토지이용 및 인구센서스 데이터를 이용하여 NO2에 미치는 영향에 대하여 다중회귀분석을 이용하여 분석하였다. 분석 결과 교통량이 많고 도로 길이가 길수록, 해안으로부터 멀수록 NO2 농도가 증가하는 것으로 나타났다. Michael 외(2003)는 네덜란드 로테르담, 독일의 뮌헨, 스웨덴의 스톡홀름을 대상으로 초미세먼지(PM2.5)의 변동 요인과 그것에 영향을 미치는 요인을 분석하고자 도로와의

거리, 도로 혼잡 정도, 과적차량수 등을 변수로 두고 GIS를 이용하여 세 지역을 비교 분석하였다. 분석결과 네덜란드의 로테르담에 초미세먼지가 높게 관측되었으며 세 지역 모두 혼잡한 도로가 많을수록 초미세먼지가 높게 나타났으며, 만헨의 경우는 주요 도로가 가까울수록, 스톡홀름은 인구밀도가 높을수록 초미세먼지의 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

Mats 외(2008)는 영국에서 교통과 대기오염과의 관계를 설명하기 위해 토지이용 데이터를 이용하여 도로의 유형, 도로와의 거리, 센서스 블록의 크기, 인구밀도 등이 미세먼지, NO<sub>x</sub>, 일산화탄소, 벤젠에 미치는 요인을 분석하였다. 분석 결과 토지이용 변수가 교통관련 대기오염수준에 통계적으로 유의한 영향을 미치고 있다는 결과를 제시하였다.

또한 Jerrett 외(2007)는 캐나다 토론토를 대상으로 NO<sub>2</sub>에 미치는 교통 요인을 분석하고자 공업 토지이용, 도로 종류, 도로 밀도, 주거 밀도 등을 변수로 놓고 회귀분석모형을 이용하여 분석하였다. 분석결과 교통 요인 중 NO<sub>2</sub> 농도에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 도로의 밀도로 나타났다. 이들은 캐나다에서 NO<sub>2</sub>의 농도가 높게 나타나는 이유가 인구밀도가 낮고 분산화 되어 있고, 토지이용을 단일 용도로만 사용하여 자동차 통행의 수요를 증가시켰기 때문이라고 주장하였다. 따라서 NO<sub>2</sub>의 농도를 줄이기 위해서는 혼합 토지이용 (mixed land use)을 통하여 자동차 이용을 줄이는 것이 필요하다는 정책적 시사점을 제시하였다.

Rijinders 외(2001)는 대기오염 농도에 미치는 요인을 분석하기 위해 고속도로 주변 및 도시화 정도에 따라 초등학교를 분류하고 각 위치에서 NO<sub>2</sub>에 미치는 영향을 회귀모형 및 혼합모형을 이용하여 분석하였다. 분석 결과 고속도로와 가까운 곳에 위치한 초등학교 학생들이 NO<sub>2</sub>에 많이 노출되었으며 또한 NO<sub>2</sub> 농도는 도시화의 정도에 따라 높아

지는 것으로 나타났다.

Brian(2008)은 미국의 45개주의 대도시를 대상으로 sprawl현상과 오존의 생성과의 관계를 분석하였다. 도시의 중심성 변수인 CBD(Central Business District) 일정 반경 내 인구비율 및 밀도, 연결성 변수인 도로의 밀도, 블록의 크기, 교차로 수, 밀도 변수인 인구 밀도 및 가구 밀도, 혼합토지이용 변수인 토지이용의 다양성, sprawl지수를 회귀모형을 이용하여 분석하였다. 분석결과 오존의 원인이 되는 질소산화물과 휘발성유기화합물(VOC)은 주로 더운 여름철에 농도가 높게 나타나 계절적 편차가 큰 것으로 나타났다. 또한 혼합토지이용일수록 오존 농도가 낮게 나타나며 sprawl 지수가 높을수록 오존의 농도도 높아지는 것으로 나타났다.

국내의 연구들을 살펴보면, 조혜진과 최동용(2009)의 연구에서는 도로환경요인이 도로변 대기오염에 미치는 영향을 분석하였다. 도로변 대기오염 데이터를 이용하여 기상, 교통량, 속도, 차로수 등의 변수가 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO에 미치는 영향을 분석한 결과 NO<sub>2</sub>에 대한 설명력이 가장 높았으며, 교통량이 증가할수록, 속도가 감소할수록 NO<sub>2</sub>의 농도는 높아지는 것으로 나타났다.

도우곤 외(2013)는 부산지역 주요 도로의 대기오염도를 조사하였는데, 현재 고정식 측정망의 형태로 운영되고 있는 대기오염 측정방식이 아닌 차량으로 이동하며 직접 대기오염도를 측정하여 데이터로 활용하였다. 2010~2012년을 상반기와 하반기로 나누어 대기오염의 농도의 변화를 파악 하였다. 분석 결과 대기오염 측정소에 의해 측정된 농도보다 오염물질 별로 2배에서 18배 이상 높은 것으로 나타나 차량 운행에 의한 대기오염이 심각함을 경고하였다.

오규식 외(2005)의 연구에서는 서울시 도시 형태가 대기오염에 미치는 영향을 분석하였다. 도시 형

테로는 인구, 면적, 토지이용, 교통, 지형과 관련된 요인을 사용하였으며, 대기오염은 대기오염 배출량 데이터를 이용하여 서울시 구별로 분석하였다. 분석 결과 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO 모두 건물면적, 교통량에 양의 상관관계가 있으며, 주거밀도, 상업업무 시설과는 큰 상관이 없다는 결과가 나타났다.

오규식과 정희범(2007)의 연구는 위의 연구의 후속연구로 서울시 각 구별로 도시의 개발밀도 변화가 NO<sub>x</sub>와 PM<sub>10</sub>에 미치는 요인을 각각 분석하였다. 분석결과 각 구별로 오염물질에 미치는 요인들은 조금씩 달랐지만 공통적으로 NO<sub>2</sub>는 가구수, 사업체수, 주거·상업토지면적 및 건축물수, 교통량 및 등록대수가 양의 상관관계를 보여주고 있으며, 주거토지이용 연면적, 주거·상업 건축물수, 교통량 및 자동차 등록대수가 PM<sub>10</sub> 수준과 정의 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다.

조운에(2004)는 수도권 개발제한구역이 대기오염에 미치는 요인에 대하여 분석하였다. 대기오염측정소의 인구밀도, 산림비율, 개발제한구역비율 등을 주요 변수로 두고 분석한 결과 산림은 대기오염 물질 감소에 영향을 미치지만 개발제한구역은 대기오염 수준에 의미 있는 영향을 미치지 않는다는 분석 결과를 제시하였다.

이원도 외(2011)의 연구는 서울시의 대기오염지수와 도시공간구조 특성의 관계에 대하여 회귀분석과 GWR(Geographically Weighted Regression)을 이용하여 분석하였다. 공간내삽법(IDW)으로 전체적인 대기오염분포를 추정하였고 시간의 흐름에 따라 농도 변화를 분석하여 대기오염 지수와 토지이용시설 및 교통자료의 상관성을 분석한 결과 GWR모형이 회귀분석보다 높은 설명력을 가지는 것으로 나타났다. 또한 토지이용시설의 수가 많은 곳에서 대기오염 농도가 높게 나타났다는 분석결과를 제시하고 있다.

## 2. 대기오염 분포 추정 방법론 관련 선행연구

본 연구에서는 대기오염 물질의 공간적 분포의 추정을 위해 널리 사용되는 공간예측기법중의 하나인 크리깅(Kriging) 보간 기법을 사용하였다. 크리깅 보간 기법은 Matheron(1962)이 광산 기술자 D.G Krige가 광물질 등급 분포를 예측하는 것을 보고 Kriging 이라 명명하였으며, 이는 관심 있는 지점에서 특성치를 알기 위해 이미 그 값을 알고 있는 주위의 값들의 선형 조합으로 그 값을 예측하는 지구통계학적 기법이다.<sup>1)</sup> 이러한 크리깅 보간 기법은 기온 및 강수 분포 추정, 지표환경 추정 및 대기오염 분포 추정 등에 많이 사용되는데 이를 활용한 선행 연구는 다음과 같다.

Aman과 Preetvanti(2013)는 GIS 소프트웨어를 이용하여 인도 아크라(Agra) 지역의 대기오염 분포를 크리깅 분석기법으로 추정하였다. 30개 대기오염 측정지점을 이용하여 일일 대기오염 분포를 분석하였다. Minguez 외(2013)의 연구에서도 스페인 마드리드지역의 오염측정 지역을 중심으로 크리깅 보간기법을 이용하여 대상지역 전체의 오염정도를 예측하여 보다 설명력 높은 분석을 시도하였다.

David 외(2004)의 연구에서는 미국의 대기오염 물질인 PM<sub>10</sub>의 공간적 분포를 Kriging, IDW, Nearest neighbor, Spatial averaging 등의 4가지 분석기법을 이용하여 추정하고 결과의 차이를 비교하였다. 비교 분석 결과 다른 분석기법에 비해 Kriging 기법이 나머지 세 기법에 비해 편의(bias)가 낮다는 결과를 보여주었다.

이 외에도 인도의 포트 블레어(Port Blair)지역의 대기오염분포를 추정한 Dilip 외(2011)의 연구, 이란의 테헤란(Tehran)지역의 PM<sub>10</sub> 농도를 크리깅 기법으로 추정한 Rouzbeh 외(2009)의 연구 등이 있다.

국내에서는 김선우 외(2005)의 연구는 공간자료를 지리적 가중회귀 모형(GWR)과 크리깅모형을 비교 분석하였다. 1999년 전국 116개 대기오염 측정망을 이용하여 일산화탄소의 공간적 분포를 분석하였는데 분석결과 GWR분석 기법보다 크리깅 분석결과가 공간자료 분석방법을 사용할 때 더 타당하다는 결과를 얻었다. 김병선 외(2010)는 정밀한 인구 분포 추정을 위해 단순회귀분석과 회귀분석-크리깅 기법을 적용하였고, 회귀분석-크리깅 모형이 더 설명력이 높다는 분석결과를 제시하고 있다.

본 연구는 다음과 같은 사항에서 기존 선행연구들과 차별된다. 첫째, 본 연구는 크리깅 보간 기법을 이용하여 수도권에 미세한 공간 단위까지 5가지 대기오염물질의 농도를 추정하고 이를 이용하여 수도권 내 도시 개발 패턴이 대기오염 수준에 미친 영향을 분석한 선도적 연구로 향후 이 분야 국내 연구를 활성화하는데 기여할 것으로 판단된다. 둘째, 본 연구에서는 도시 개발 패턴을 나타내는 설명변수로 인구 및 고용 밀도, 제조업 및 화력 발전소 위치, 교통변수로 교차로와 도로면적, 도시공간구조 변수로 중심도시, 위성도시, 교외지역 등 공간적 요소, 서해안 및 한강에 대한 접근성 등 대기오염에 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수들을 모형에 포함하였다는 장점이 있다.

셋째, 본 연구에서는 대기오염 물질의 농도를 환경부가 제시하는 통합대기환경지수(CAI)로 환산하여 분석에 활용하였기 때문에 대기오염 물질별 상이한 측정단위를 동일한 대기 건강 지수로 분석하였다는 장점이 있다. 넷째, 기존 국내 연구가 측정소 기준의 대기오염 자료와 행정동 기준 도시 특성 변수를 사용한 반면 본 연구는 수도권을 약 100만 개의 점으로 구분하고 각각의 포인트에 대한 대기오염 수준을 크리깅 보간법으로 추정하였고, 도시개발 특성도 행정동보다 훨씬 세분화된 4만 여개의 집계구 단위로 구축하여 이를 분석에 활용하였기

때문에 기존 연구보다 공간적으로 미시적 분석이 가능하다는 장점이 있다.

### III. 수도권 대기오염 현황

#### 1. 분석 자료 설명

본 연구에서 사용되는 수도권 대기오염 측정 자료는 환경부에서 공개하고 있는 전국대기환경정보 자료 중 2010년의 서울, 인천 경기도에 해당하는 대기 측정소를 기준으로 일일 데이터를 사용하였다. 2010년 데이터를 활용한 이유는 대기오염에 영향을 미칠 것으로 예상되는 도시 특성 변수(인구, 산업, 교통, 도시공간구조 등)가 2010년 자료로 구축되어 있기 때문이다.

대기오염물질은 대기오염 측정망이라는 측정소에서 측정하게 되는데 도시 대기 측정망에서는 도심 거주지역의 평균대기질 농도를 측정하고, 교외대기 측정망에서는 도시를 둘러싼 교외 지역의 배경농도를 측정한다. 국가배경농도 측정망에서는 외국으로의 오염물질 유입, 유출상태 등을 파악하고, 도로변 대기 측정망에서는 자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변 대기 농도를 측정하게 된다.<sup>2)</sup> 그림 1은 본 연구에서 사용되는 120개 지점의 측정소를 보여 주고 있다.

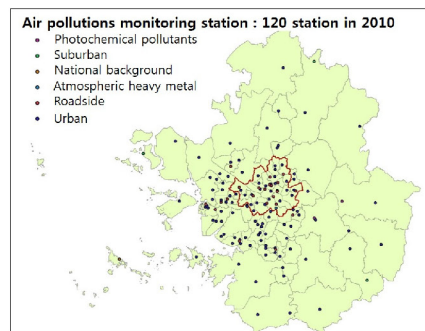


Fig 1. Air pollution station in SMA

## 2. 오염 물질별 수도권 대기오염 현황

본 절에서는 5가지 오염 물질에 대해 측정소별 2010년 1년 동안 일일 측정량 자료를 이용해 각 오염물질 별로 가장 높은 값을 갖는 측정소의 연간 오염물질 분포를 분석하였다. 연 평균이 아닌 가장 높은 값을 보는 이유는 대기오염물질의 농도 분포를 뚜렷하게 알 수 있기 때문이다. 물론 대기오염의 농도나 분포 현황은 기상 및 풍속 풍향에 따라 다르게 나타난다. 그렇지만 본 연구에서는 높은 오염 농도에서의 도시 특성과의 관계를 명확하게 알고자 가장 높은 값을 사용하였다. 그림 2 ~ 6은 각 오염 물질별로 가장 높은 농도의 값을 보인 날의 분포도와 농도값을 표현하였으며 일 년 중 어느 계절에 높은 농도값을 갖는지 표현하였다.

그림 2는 PM10의 농도가 가장 높은 날의 측정값이다. PM10의 경우 도시대기 측정소 중 하나인 파주의 금촌동 측정소에서 가장 높은 값을 보였으며

주요 수도권 서쪽 지역과 북쪽 지역에서 높은 농도를 보이고 있다. 경기도 파주 금촌 측정소에서 연간 PM10 농도 변화를 분석해 보았을 때, 봄, 가을이 상대적으로 높은 것을 알 수 있었고, 특히 봄(3월 16일)에 PM10 농도가 334 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균 61.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 매우 높은 농도가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 교외지역의 미세먼지, 인천의 공업단지 등이 원인으로 보인다.

O3는 그림 3에서 보이는 것과 같이 국가배경농도 측정소 중 하나인 덕적도 측정소에서 가장 높은 값을 보였으며 수도권 남서쪽을 중심으로 높은 농도를 보이고 있다. 덕적도 측정소에서 연간 O3 농도 변화를 분석해 보았을 때, 여름이 상대적으로 높은 것을 알 수 있고, 특히 6월 25일에 O3 농도가 0.096ppm으로 평균 0.04에 비해 높은 것을 알 수 있다. 이는 오존의 특성상 자외선이 강한 여름에 잘 생성되기 때문으로 판단된다. 덕적도의 O3 농도가 타 지역보다 높게 나타나는 것은 자체 오염

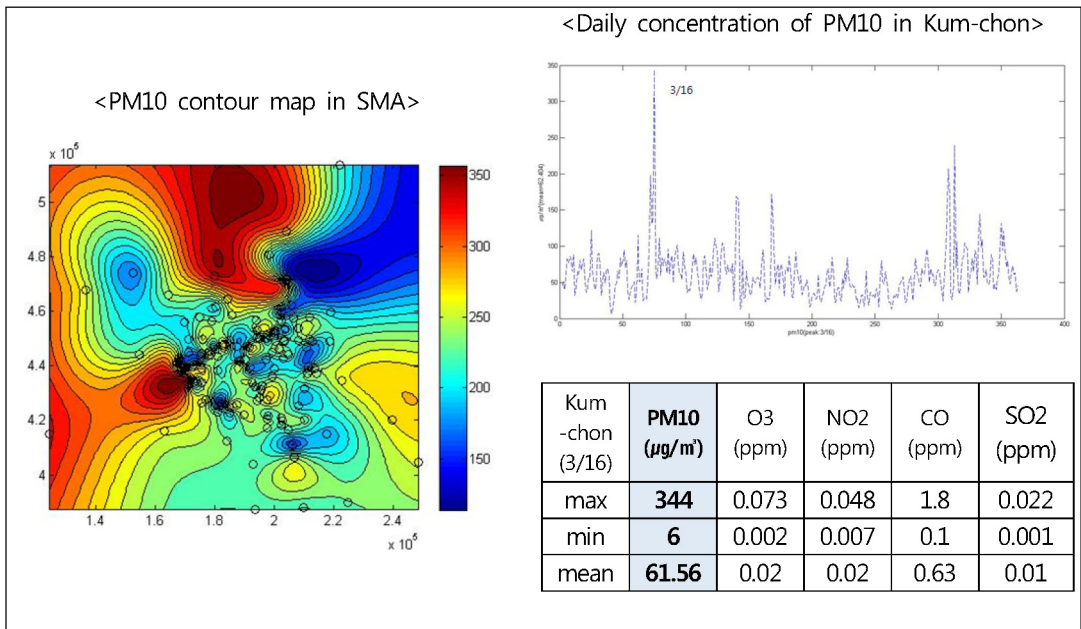


Fig 2. PM10 distribution and concentration in SMA

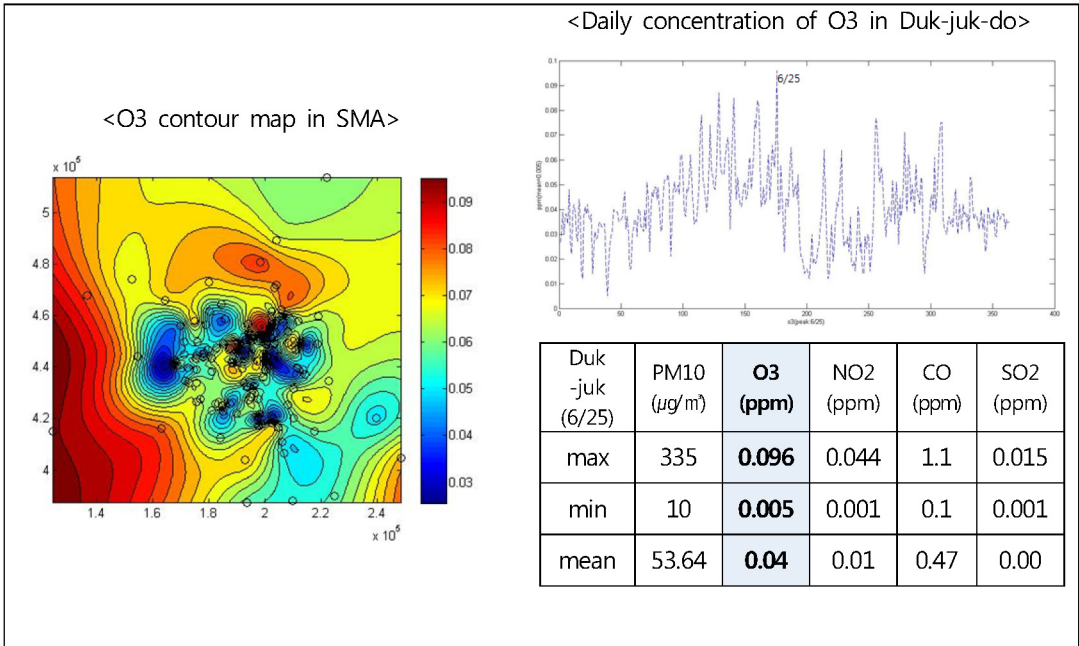


Fig 3. O3 distribution and concentration in SMA

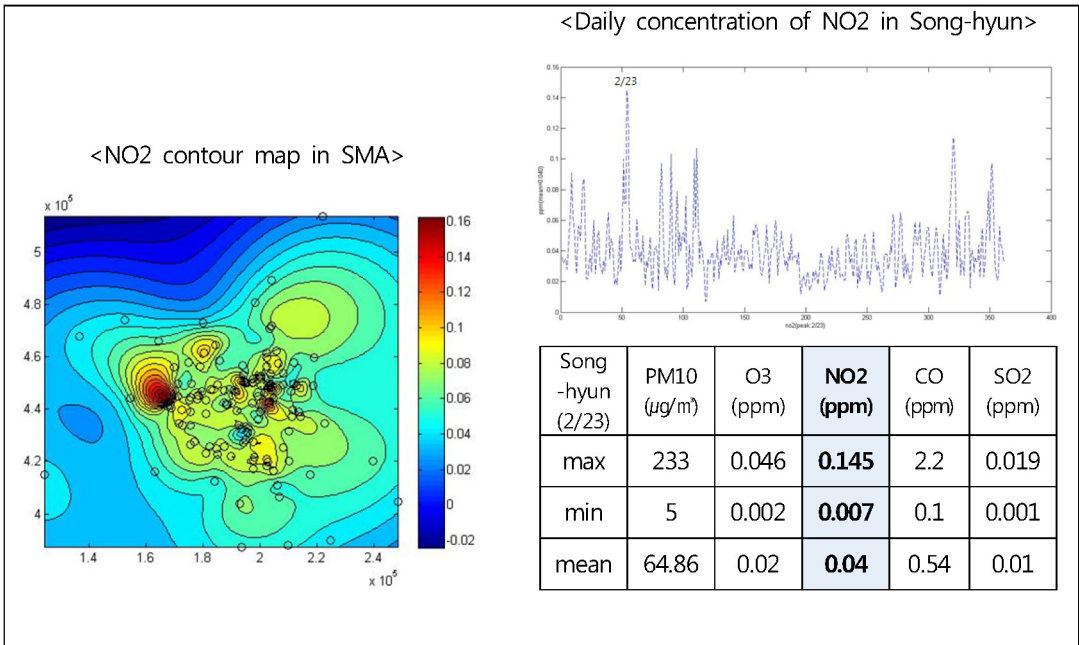


Fig 4. NO2 distribution and concentration in SMA

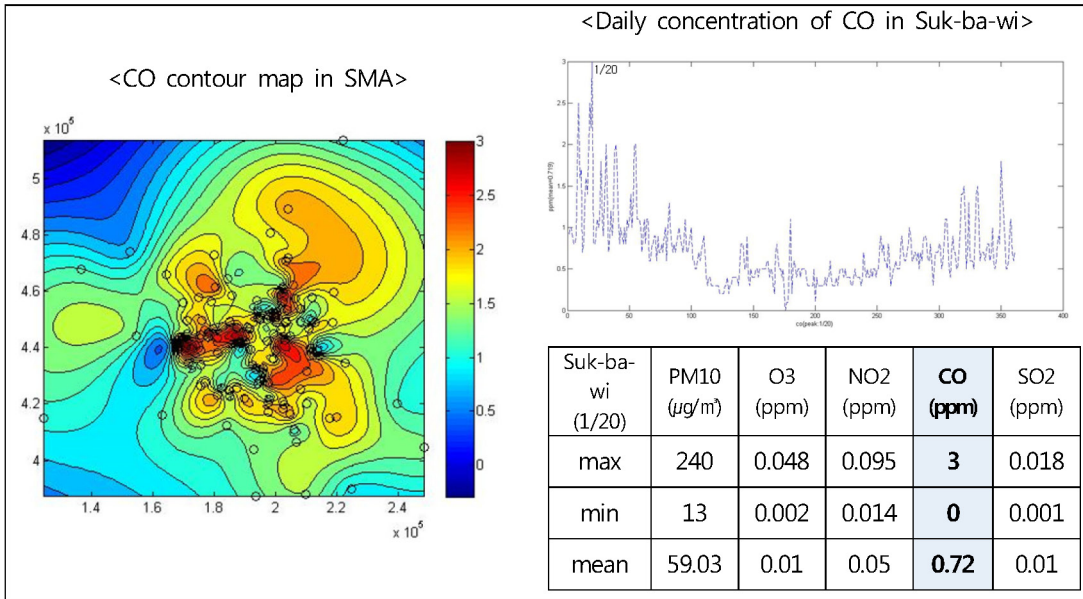


Fig 5. CO distribution and concentration in SMA

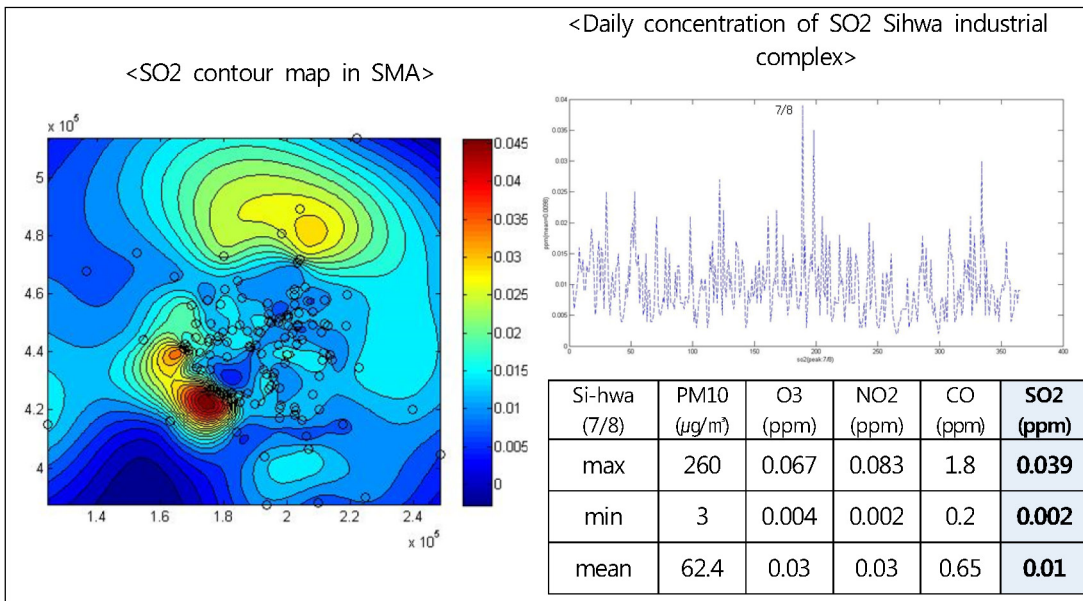


Fig 6. SO2 distribution and concentration in SMA

물질 발생이 아닌, 해안적 입지 특성과 중국에서 불어오는 대기오염 때문에 높게 나타나는 것으로 파악되고 있다.<sup>3)</sup>

그림 4의 NO2는 도로변 대기 측정소 중 하나인 송현 측정소에서 가장 높은 값을 보였으며 인천 지역을 중심으로 높은 농도를 보이고 있다. 송현 측



정소에서 연간 NO<sub>2</sub> 농도 변화를 분석해 보았을 때, 겨울에 상대적으로 높은 것을 알 수 있었고, 특히 이때 NO<sub>2</sub> 농도가 0.145ppm으로 평균 0.04에 비해 높은 농도가 나타나는 것을 알 수 있다. NO<sub>2</sub> 물질의 주요 배출원이 발전소 및 제조업이기 때문에, 특히 서해안을 따라 밀집된 발전시설과 제조업체들로 인하여 서해안 지역에 NO<sub>2</sub>농도가 높은 것으로 파악되었다.

CO는 그림 5와 같이 도로변 대기 측정소 중 하나인 석바위 측정소에서 가장 높은 값을 보였으며 인천 지역과 서울 및 도심 지역을 중심으로 높은 농도를 보이고 있다. CO의 주요 배출원이 자동차 배출 물질이기 때문에, 타 오염물질에 비해 도심지에서 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 석바위 측정소에서 연간 CO 농도 변화를 분석해 보았을 때, 겨울에 상대적으로 높은 것을 알 수 있었고, 특히 1월 20일에 CO 농도가 3ppm으로 평균 0.72에 비해 높은 농도가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 겨울철에 자동차 엔진이 불완전 연소를 많이 하기 때문으로 판단된다.

마지막으로 SO<sub>2</sub>는 도시 대기 측정소 중 하나인 시화공단 측정소에서 가장 높은 값을 보였으며 시화공단 지역을 중심으로 높은 농도를 보이고 있다. SO<sub>2</sub>의 주요 원인이 제조업체에서 배출되는 배기가스에 비롯된 것이기 때문에 제조업 공장들이 주로 몰려 있는 시화공단에서 SO<sub>2</sub> 배출이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 시화공단 측정소에서 연간 SO<sub>2</sub> 농도 변화를 분석해 보면, 여름에 상대적으로 높은 것을 알 수 있었고, 특히 7월 8일에 SO<sub>2</sub> 농도가 0.039ppm으로 평균 0.01에 비해 높은 농도가 나타나는 것을 알 수 있다.

### 3. 수도권 대기오염 분포 추정

수도권 대기오염 분포의 공간예측을 위해서는

공간 보간기법을 이용하여 보다 정밀한 공간 분포의 예측이 이루어져야 한다. 크리깅(Kriging)이란 임의의 확률변수에 대해서 측정된 위치에서 측정값을 이용하여 측정되지 않은 위치에서의 확률변수에 대한 수치를 가중선형회귀로 예측하는 공간예측방법이다(최승배 외 2008). 본 연구에서는 크리깅(Kriging)기법을 활용하여 2010년 기준 120개의 수도권 대기오염 측정소를 중심으로 수도권 전체의 대기오염정도를 예측하도록 한다.

크리깅 과정은 먼저 베리오그램을 추정하고 추정된 베리오그램을 이론베리오그램과 비교하여 이론베리오그램에 가까운 모형을 이용하여 미지의 위치에 대한 값을 예측하는 단계로 나누어진다.<sup>4)</sup> 이론적 베리오그램(Theoretical Variogram)은 자료의 공간적 상관관계를 이상적으로 표현한 베리오그램을 말하며 실험적 베리오그램의 경향을 잘 표현하는 모형의 선택이 중요하다. 왜냐하면 선택된 모형이 최종 크리깅 예측 값에 영향을 주기 때문이다.

부록 표 1은 본 연구의 대기오염 분포 추정에 대한 오염 물질별 이론베리오그램을 나타내고 있다. 이론베리오그램은 Linear, Spherical, Exponential, Gaussian, Polynomial 등의 모형을 이용하여 nugget, sill, range 등을 구하여 계산하는 것이 통상적이나 본 연구에서는 기존의 연구에 비해 더 정확한 모형을 구축하기 위해 실험 베리오그램과 가장 비슷한 모형을 선택하였다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 크리깅 보간법을 이용하여 추정된 대기오염 수준을 환경부의 통합대기환경지수<sup>6)</sup>로 환산하여 분석에 활용한다. 그 이유는 대기오염 물질별로 측정단위가 달라 오염물질별로 동일한 단위를 가지는 지수화의 필요성과 도시민의 건강적 관점에서 대기오염 수준을 평가할 필요가 있기 때문이다. 그림 7은 크리깅 분석 결과 부록 표 2에 제시된 바와 같이 통합대기환경지수(CAI, Comprehensive air-quality index)로 환산된 수도권 추정 대기오염

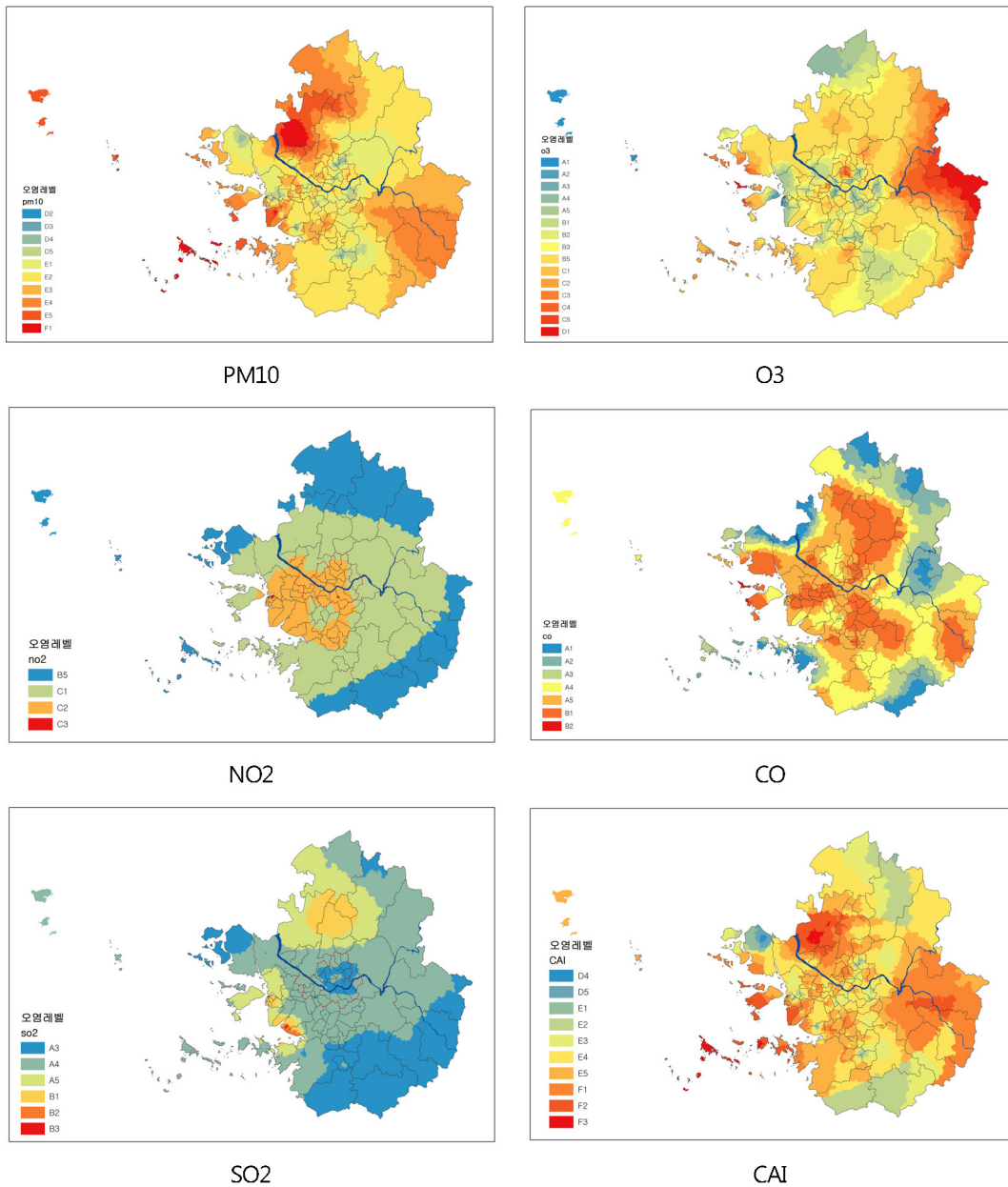


Fig 7. Estimated air pollution level

수준을 나타내고 있다 (구체적인 크리깅 기법을 활용한 수도권 대기 오염 추정: 김희재·전명진 (2014)를 참고할 것). 이는 각각의 오염물질을 통합

하여 보여주는 그림으로 오염 농도를 각각의 지수로 환산하여 종합적인 오염 농도의 현황으로 볼 수 있다. 그림 7에서 보여지는 레벨은 기존의 대기오

염지수가 A, B, C, D, E 5개의 등급으로 분류되어 있는 것을 더 세부적인 분포를 파악하기 위해 5개 등급을 25개 등급으로 세분화 하였다. 앞서 살펴본 대기오염현황과 거의 일치하는 것으로 보이며 그림 7의 오른쪽 하단의 대기오염통합지수의 경우 산업 단지가 밀집하여 있는 인천 및 안산, 시흥지역, 파주 일대 광주 여주 일대등 주로 산업단지 지역과 수도권 북서쪽의 대기질이 좋지 않음을 알 수 있다.

#### IV. 도시특성과 대기오염 수준간의 관계 분석

도시 특성과 대기오염 수준간의 관계를 분석하기 위하여 앞 절에서 추정된 오염 물질별 대기오염 수준을 종속변수로, 도시 개발 특성을 나타내는 개발 밀도, 산업입지 요소, 교통시설 요소, 도시공간구조 요소, 그리고 접근성 요소 등을 설명변수로 채택하여 다중 회귀분석 모형을 구축하였다. 이때 분석의

공간단위를 집계구로 사용하여 미시적 분석이 가능하도록 모형을 구축하였다. 집계구 데이터는 통계청에서 인구 조사 등의 통계 조사를 목적으로 인구 500명 정도의 규모에 크기는 읍면동 크기의 약 1/25로 세분화한 공간단위<sup>9)</sup>이다. 집계구 데이터를 사용하면 읍면동 단위의 데이터 보다 더 정확한 분석을 할 수 있는 장점이 있다.

다중 회귀분석모형에서 종속변수는 각각의 5개 오염물질을 사용하였으며 1년 중 대기오염농도가 가장 높은 날의 농도 값을 CAI 지수로 바꾸어 분석 하였다. 독립변수를 구체적으로 살펴보면 개발밀도는 집계구별 인구밀도, 고용밀도를 사용하였고 산업요인에는 대기오염물질 배출에 직·간접적으로 영향을 미치는 집계구별 제조업체 종사자수, 화력 발전소 주변지역<sup>10)</sup>더미를, 교통요인은 차량에서 나오는 대기오염의 영향을 반영하기 위해 집계구 내 도로면적 비율, 교차로수 비율을 사용하였다. 도시공간구조 요인은 대기오염이 지역별로 다르게 분포되어 있는 것을 감안하여 수도권 공간을 중심도시

Table 1. Variable summary statistics (N=41427)

Variables		Mean	S.D.	Min	Max
Dependent variables	PM10(index)	276.56	24.01	187.50	372.09
	O3(index)	74.57	17.26	0	164.67
	CO(index)	46.05	7.31	0	64.25
	NO2(index)	110.04	4.52	75.97	126.19
	SO2(index)	33.60	6.24	20.10	72.78
Density	Population density	0.05	0.04	0	3.52
	Employment density	4.E-03	9.E-03	0.E+00	2.E-01
Industry	Number of manufacturing employees	34	369.48	0	26128
	Power station	0.09	0.28	0	1
Transportation	Road intersection ratio	1.E-05	4.E-05	0	9.E-04
	Road area ratio	0.05	0.09	0	1.29
Urban structure	Seoul	0.40	0.49	0	1
	Inner ring	0.44	0.50	0	1
	Outer ring	0.16	0.37	0	1
	Greenbelts dummy	0.02	0.15	0	1
Proximity	West sea	22218.96	12703.89	16.12	118217.33
	Han-river	12396.72	11444.20	0	129440.85

(서울시), 위성도시 (inner ring), 교외지역 (outer ring)<sup>9)</sup>으로 구분하여 더미처리 하였다. 그리고 그린벨트가 대기오염 감소에 미치는 효과를 보기 위하여 그린벨트에 해당하는 집계구 지역을 더미 처리 하였다. 접근성 요인으로는 중국에서 불어오는 서풍 및 한강과의 대기오염의 관계를 알아보기 위해 서해안으로부터 거리, 한강으로부터 거리를 변수로 사용하였다.

표 1은 분석 모형에 사용된 종속 및 독립변수의 기초 통계량을 나타내고 있다. 각 오염물질은 CAI 추정 지수표(부록 표 2)를 참고하여 지수화하여 각 오염물질의 정도를 같은 수준으로 맞추었으며, 종속 변수로 사용되는 다섯 가지 오염물질에 대해서 모두 자연로그를 취하여 분석하였다. 다섯 가지 오염물질 중 PM10은 평균값이 276.56으로 가장 높은 오염수준을 나타내고 있으며, SO2가 평균 33.6으로 가장 낮은 수치를 갖고 있다. 인구 밀도와 고용 밀도는 집계구 별 각각 평균 0.05인/m<sup>2</sup>, 0.004인/m<sup>2</sup>로 나타났다. 제조업 종사자수는 집계구 별로 0명에서 최대 26,128명이 종사하고 있는 것으로 나타났으며, 발전소 주변지역은 전체 집계구 중 9%에 해당하는 지역으로 나타났다. 집계구 내 교차로 수의 비율은 평균 0.001%, 집계구 면적에서 도로가 차지하는 비율은 5%로 나타났으며, 수도권 지역 중 그린벨트에 해당하는 집계구는 전체 2%<sup>10)</sup>로 나타났다. 또한 서해안으로부터의 거리와 한강으로부터의 거리는 각각 평균 22km와 12km로 나타났다.

표 2는 각 오염 물질에 대한 회귀분석결과를 제시하고 있다. PM10 모형의 설명력은 0.18, O3는 0.08, CO는 0.11, SO2는 0.39 그리고 NO2는 0.67로 각각 분석 되어 독립변수들이 NO2 오염 수준에 미치는 영향에 대한 설명력이 가장 높은 것으로 나타났다. 본 회귀모형들의 설명력은 대체로 낮은 편이지만 F검정 결과 모든 모형이 유의하게 나타나 본 모형에 대해서 설득력이 있다고 볼 수 있다.

개발 밀도와 대기오염간의 관계를 보면 NO2와 CO의 경우 인구밀도와 정(+)의 관계에 있어 인구 밀도가 늘어날수록 CO와 NO2의 CAI가 증가하는 것으로 분석되었다. 특히 인구밀도가 1단위 늘어날수록 CO의 CAI 지수가 20% 증가하는 것으로 보아 CO의 오염수준과 인구밀도간에 높은 관련성이 있는 것으로 분석되었다. 고용밀도의 경우도 인구밀도와 마찬가지로 CO와 NO2의 CAI 수준과 통계적으로 유의한 정(+)의 관계에 있는 것으로 나타나 고용밀도가 이들 대기오염 물질을 높이는데 기여하는 것으로 나타났다.

산업요인 중 제조업 종사자수는 O3와 SO2가 통계적 유의성을 갖고 CAI 증가에 기여하는 것으로 분석되었다. 특히 SO2는 제조업체에서 발생하는 대기오염물질과 관련이 있으며, 실제 분석결과에도 제조업체 종사자 수가 SO2의 CAI 지수 증가에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 발전소 주변지역은 PM10, CO, NO2가 통계적으로 유의하게 증가하는 것으로 분석되었다. 이 중 NO2 물질은 고온 공정에서 많이 발생하는 물질로 주로 발전소 주변지역에서 농도가 높게 나타나는 것으로 알려져 있어 분석결과는 이러한 현상을 잘 설명하고 있다.

교통요인 중 교차로 비율은 O3, SO2에서 통계적으로 유의한 정(+)의 관계로 분석된 것을 알 수 있는데, 이는 교차로 수가 많을수록 차량이 정체하고 있는 시간이 길며, 이것은 배출되는 대기오염 물질이 많아지는 것을 의미한다. SO2는 주로 디젤 자동차 등에서 많이 발생하는데 이 역시 대기오염 물질 증가에 기여하는 것으로 분석 되었다. 도로 면적 비율의 경우 면적이 클수록 차가 많이 다니는 것을 가정하였을 때, CO와 NO2 물질에서 통계적으로 유의미한 정(+)의 관계가 나타났다. CO와 NO2 역시 자동차 배기가스에 주요 물질이며, 교차로 수와 도로 면적은 각각 이러한 오염물질의 CAI 지수를 높이는데 기여하고 있는 것으로 분석되었다.

Table 2. Analysis results

variable		ln_pm10		ln_o3		ln_co		ln_so2		ln_no2	
		β	t-value	β	t-value	β	t-value	β	t-value	β	t-value
Intercept		5.693	4260.17***	4.304	1034.71***	3.885	1094.58***	3.750	1679.5***	4.742	11448.2***
Density	Pop_density	-0.075	-7.95***	-0.004	-0.12	0.205	8.22***	-0.112	-7.11***	0.005	1.85*
	Emp_density	0.074	1.6	-2.109	-14.63***	0.366	2.97**	-0.488	-6.3***	0.136	9.45***
Industry	Manufacturing employee	-1.67E-07	-0.16	6.29E-06	1.92*	-5.8E-06	-2.06*	1.135E-05	6.45***	-2.81E-07	-0.86
	Power station area	0.004	2.6**	-0.051	-11.75***	0.010	2.68**	0.001	0.41	0.010	22.96***
Transportation	Intersection ratio	-33.449	-3.31**	122.593	3.89***	15.134	0.56	178.078	10.53***	-9.727	-3.1**
	Road area ratio	-0.011	-2.42*	-0.095	-6.45***	0.090	7.2***	-0.028	-3.61**	0.007	4.77***
Urban structure	Seoul****	-0.071	-67.15***	-0.031	-9.44***	0.002	0.88	-0.119	-67.18***	0.014	41.55***
	Outer ring****	0.036	26.69***	0.179	42.35***	-0.139	-38.69***	0.027	12.11***	-0.054	-128.24***
	Greenbelt dummy	-0.008	-3.07**	0.004	0.5	-0.015	-2.1*	-0.007	-1.56	-0.001	-0.96
Proximity	West sea	-1E-06	-27.78***	6.04E-07	5.17***	-2.1E-06	-21.37***	-6.68E-06	-106.57***	-1.2E-06	-106.58***
	Han-river	-2E-06	-43.01***	-2.8E-06	-19.75***	-1.7E-06	-13.67***	-4.32E-06	-56.93***	-1.1E-06	-78.17***
F		816.32***		341.95***		467.84***		2372.92***		7801.71***	
R-Square		0.1783		0.0833		0.1105		0.3866		0.6745	
Adj R-Square		0.1781		0.083		0.1103		0.3864		0.6744	

\*p<0.1 \*\*p<0.05, \*\*\*p<0.001, \*\*\*\* : inner ring (reference)

도시공간구조 요인의 분석결과를 살펴보면 PM10, O3 및 SO2의 경우, 서울보다 서울 위성도시 (inner ring) 에서, 서울 위성도시 보다 수도권 외곽지역(outer ring) 에서 더 높은 CAI 지수를 가지는 것으로 나타났다. 이는 수도권 외곽지역으로 갈수록 이들 오염물질이 높게 분포하는 것을 알 수 있으며, 앞서의 크리깅 분석 결과에서 본 수도권 대기오염 분포와 일치 하는 것을 알 수 있다. CO는 수도권 외곽지역 보다 서울 주변지역 일수록 더 많이 배출 되는 것을 알 수 있다. 이는 CO의 주요 배출원인 자동차가 수도권 외곽보다 수도권 중심에

더 많이 집중되어 있기 때문에 판단된다. NO2의 경우 서울 위성도시보다 서울지역이, 수도권 외곽지역 보다 서울 위성도시에서 더 높은 CAI 지수를 가지는 것으로 분석되어 NO2는 PM10, O3 및 SO2와는 반대로 도시 중심으로 갈수록 더 높아지는 경향을 가지는 것으로 분석되었다. 그린벨트는 PM10 과 CO의 CAI를 낮추는데 기여하는 것으로 나타나 이들 대기오염 물질에 대한 그린벨트의 대기오염 저감효과를 통계적으로 확인할 수 있다.

접근성 요인 중 서해안으로부터 거리에 대한 분석결과를 보면 PM10, CO, SO2, 그리고 NO2는 통

계적으로 유의미한 음의 값을 가지는 것으로 분석되어 서해안에 가까워질수록 CAI 지수가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 서해안 쪽에 제조업, 발전소 등 오염 배출원이 집중되어 있고 또 중국과의 근접성 때문인 것으로 판단된다. 또한 한강으로부터 거리변수도 모든 오염물질에 대해 통계적으로 유의한 음의 값을 가지는 것으로 나타나 한강에 가까울수록 CAI 지수가 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과는 한강이 서울을 가로질러 통과하기 때문에 중심도시와 교외지역의 대기오염수준이 열악하다는 것을 보여주는 것으로 해석할 수 있다.

## V. 결론

본 연구는 2010년 수도권 대기오염 측정소의 일일 데이터를 이용하여 수도권 대기오염분포를 크리깅(Kriging) 분석기법을 이용하여 추정하고, 이를 이용하여 도시특성이 대기오염 수준에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다. 주요 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 인구 밀도와 고용밀도는 CO와 NO<sub>2</sub>의 CAI 지수를 증가시키는데 기여하는 것으로 나타나 인구 밀도와 고용밀도가 높은 곳에서 이들 대기오염 물질의 건강 위해 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 둘째, 제조업 종사자수는 O<sub>3</sub>와 SO<sub>2</sub>가 통계적 유의성을 갖고 CAI 지수 증가에 기여하는 것으로 분석되었으며 발전소 주변지역은 PM<sub>10</sub>, CO, NO<sub>2</sub>가 통계적으로 유의하게 증가하는 것으로 분석되었다. 셋째, 교통요인 중 교차로 비율은 O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>에서 통계적으로 유의한 정(+)의 관계, 도로 면적 비율은 CO와 NO<sub>2</sub>의 CAI 지수에서 통계적으로 유의미한 정(+)의 관계가 나타났다. 넷째, 도시공간구조 요인은 도시 내 대기오염 수준에 영향을 미치는 중요한 요인으로 파악되었다. 흥미로운 사실은 PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub> 및 SO<sub>2</sub>의 경우, 중심도시에서 수도권 외곽지역(outer

ring)으로 갈수록 더 높은 CAI 지수를 가지는 것으로 나타난 반면 CO와 NO<sub>2</sub>는 도시 중심으로 갈수록 더 높아지는 경향을 가지는 것으로 분석되었다. 또한 그린벨트는 PM<sub>10</sub>과 CO의 CAI를 낮추는데 기여하는 것으로 분석되었다. 다섯째, 서해안으로부터 거리와 한강으로부터 거리 모두 PM<sub>10</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, 그리고 NO<sub>2</sub>와 통계적으로 유의미한 음의 값을 가지는 것으로 분석되어 이들 지역에 가까워질수록 CAI 지수가 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구의 분석결과는 도시 개발 및 대기 환경 분야 정책 입안과 집행 시 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 첫째, 본 연구의 분석결과는 도시 개발 특성이 대기오염 물질별로 상이한 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 대기 환경정책의 목표가 도시민을 대기환경오염으로 인한 건강적 위험을 경감하고 삶의 질을 제고하는 것이기 때문에 대기오염 수준을 측정하는 측정소의 공간적 배치와 측정물질의 종류를 결정할 때 도시 개발 패턴을 고려하여야 할 것이다. 특히 인구 2,500만명이 거주하고 있는 수도권에 120여개의 측정소만 설치되어 있어 공간적으로 정확한 대기오염 정보를 획득하는데 한계가 있다. 도시 공간구조 및 개발 패턴을 고려한 추가적인 대기오염 측정소를 설치할 필요가 있다.

둘째, 본 연구의 분석결과로 제시된 인구 및 고용밀도가 높은 도심 및 부도심 지역, 교차로 및 광로 및 대로인접지역, 제조업 및 발전소 인접 지역 등에서 높은 CAI 지수를 나타내고 있어 대기오염 물질을 경감하기 위한 도시 개발 패턴에 따른 맞춤형 대기 환경정책이 입안되고 집행될 필요가 있다.

셋째, 동일한 대기오염 수준에도 도시민의 경제적 상태나 인구학적 특징에 따라 상이한 대기오염 위험에 노출되기 때문에 이에 대한 정확한 분석과 대응방안을 마련해야 할 것이다. 예를 들어 경제적으로 빈곤한 저소득 계층은 주거나 직장입지 선택

의 자유가 제한되어 있기 때문에 중산층이나 고소득층보다 환경적으로 열악한 상태에서 생활할 가능성이 높다. 또한 노인이나 어린이는 다른 연령 계층보다 대기오염 노출에 따른 건강적 피해가 훨씬 심각한 것으로 알려져 있다. 따라서 수도권에서 노령자 밀집지역이나 저소득층 거주 지역에서의 대기오염 수준을 평가하여 환경 불평등을 해소하기 위한 추가적인 분석과 정책적 대안을 마련해야 할 것이다.

본 연구는 시계열 데이터인 실시간 대기오염 데이터를 사용한 다음과 같은 한계가 있다. 시계열 자료를 이용하여 특정시점의 도시 특성과 비교할 때는 시계열 자료의 평균값이나 중위수 등을 사용할 수 있지만 통상 대기오염 물질의 농도는 농도가 높을때가 주요 관심사이다. 따라서 농도가 최대값을 보이는 날의 하루 데이터를 본 연구에 사용하였다. 그렇지만 이 결과를 일반화하기에는 한계가 있어 향후 시계열에 따른 대기오염과 도시 특성의 관계에 대한 후속 연구를 할 계획이다.

주1. [www.biz-gis.com](http://www.biz-gis.com)  
 주2. [www.airkorea.or.kr](http://www.airkorea.or.kr)  
 주3. 국립환경과학원 보도자료(2009.9.9)  
 주4. 자세한 베리오그램 분석 절차는 최승배 외(2008)을 참고  
 주5. Trauth(2007)은 nugget, sill, range 등을 추정할 때 눈으로 직접 그래프를 보고 판단 하는것이 적합하며, 실제 기존의 대표적 이론베리오그램인 Linear, Spherical, Exponential, Gaussian, Polynomial 모형 이외에도 적합한 모형을 사용할 수 있다고 하였다.  
 주6. 통합대기환경지수는 환경부가 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 표현방식이다([www.airkorea.or.kr](http://www.airkorea.or.kr)).  
 주7. 통계지리정보서비스 ([www.sgis.kostat.go.kr](http://www.sgis.kostat.go.kr))  
 주8. 발전소 주변지역 지원에 관한 법률에 따른 발전소 주변지역 : 발전소 반경 5km  
 주9. 중심도시: 서울시, 위성도시 (inner ring) : 서울을 둘러싸고 있는 경기도 시군 및 인천시, 교외지역 (outer ring): 경기도 시군 중 위성도시를 제외한

나머지 지역  
 주10. 수도권 집계구 개수에서 그린벨트에 해당하는 집계구 개수의 비율

인용문헌  
 Reference

1. 김병선·구자용·최진무, 2010. “Regression-Kriging 모형을 이용한 인구 분포 추정에 관한 연구”, 「대한지리학회지」, 5: 806-819.  
 Kim, B., Ku, J., Choi, J., 2010. “Population Distribution Estimation Using Regression-Kriging Model”. *Journal of the Korean Geographical Society*, 5: 806-819.  
 2. 김선우·정애란·이성덕, 2005. “공간자료에 대한 지리적 가중회귀 모형과 크리깅의 비교”, 「응용통계연구」, 18(2):271-280.  
 Kim, S., Jeong, A., Lee, S., 2005. “Comparison between Kriging and GWR for the Spatial Data”, *The Korean Journal of Applied Statistics*, 18(2):271-280.  
 3. 김희재·전명진, 2014. “대기오염수준이 수도권 아파트 전세가격에 미치는 효과에 관한 연구: 공간헤도닉 가격모형 접근법 분석”, 「지역연구」, 30(2): 27-48.  
 Kim, H., Jun, M., 2014. “An Analysis on the Effect of Air Pollution on the Apartment Rents in the Seoul Metropolitan Region”, *Journal of the KRSA*, 30(2): 27-48.  
 4. 도우근·정우식·유은철·곽진, 2013. “이동 측정방법을 사용한 부산지역 주요 도로의 대기오염도 조사”, *Journal of Environmental Science International*, 22(9): 1199-1211.  
 Do, W., Jung, W., Yoo, E., Kwak, J., 2013. “An Investigation into Air Quality of Main Roads in Busan using Mobile Platform Measurement”, *Journal of Environmental Science International*, 22(9): 1199-1211.  
 5. 오규식·구자훈·조창제, 2005. “도시형태 구성요소가 지역별 대기오염에 미치는 영향”, 「국토계획」, 40(3): 159-170.  
 Oh, K., Koo, J., Cho, C., 2005. “The Effects of Urban

- Spatial Elements on Local Air Pollution”, *Journal of Korea Planners Association*, 40(3): 159-170.
6. 오규식·정희범, 2007. “도시의 개발밀도 변화가 대기 오염에 미치는 영향” 「국토계획」, 42(5): 197-200.
  - Oh, K., Chong, H., 2007. “The Influence of Urban Development Density on Air Pollution”, *Journal of Korea Planners Association*, 40(3): 159-170.
  7. 이원도, 원종서, 조창현, 2011. “대기오염 지수와 도시 공간 구조 특성에 관한 연구”, 「한국경제지리학회지」, 4: 143-156.
  - Lee, W., Won, J., Cho, C., 2011. “A Study of Correlation between Air Environment Index and Urban Spatial Structure: Based On Land Use and Traffic Data In Seoul”, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, 4: 143-156.
  8. 조윤애, 2004. “개발제한구역정책이 대기오염에 미치는 영향”, 「지역연구」, 20(2): 77-95.
  - Cho, Y., 2004. “Impacts of Restricted Development Zone Policy on Air-pollution”, *Journal of the KRS4*, 20(2): 77-95.
  9. 조혜진·최동용, 2009. “도로환경요인이 도로변 대기오염에 미치는 영향분석”, 「대한교통학회지」, 27(6): 139-146
  - Cho, H., Choi, D., 2009. “Effects of Road and Traffic Characteristics on Roadside Air Pollution”, *Journal of Korean Society of Transportation*, 27(6): 139-146
  10. 최승배·문승호·강창완·조장식·이정형, 2008. SAS/STAT를 이용한 공간예측, 경기: 자유아카데미.
  - Choi, S., Moon, S., Kang, C., Cho, J., Lee, J., 2008, *Spatial Estimate using by SAS/STAT*, Free academy, Gyeonggi
  11. Aman Tyagi and Preetvanti Singh, 2013 “Applying Kriging Approach on Pollution Data Using GIS Software”, *International Journal of Environmental Engineering and Management*, 4(3): 185-190.
  12. Brian Stone Jr., 2008. “Urban sprawl and air quality in large US cities”, *Journal of Environmental Management*, 86: 688-698.
  13. DAVID W. WONG et.al., 2004. “Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data”, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14: 404-415.
  14. Dilip Kumar Jha et.al., 2011. “Evaluation of Interpolation Technique for Air Quality Parameters in Port Blair, India”, *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 1(3): 301-310.
  15. Jerrett M., Arain A., Kanaroglou P., et al., 2007. “Modelling the intra-urban variability of ambient traffic pollution in Toronto, Canada”, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 70: 200-212.
  16. Jun, M.-J, 2010. “Spatial Transformation and Regional Disparity, Housing, Transportation and Emissions”, Joint workshop of Korea Planners Association and OECD, KRIHS: OECD.
  17. Matheron, G., 1962, *Trait’e de g’ostatistique appliquee*, Tome I: M’moires du Bureau de Recherches G’ologiques et Mini’eres, no. 14, Editions Technip, Paris, 333.
  18. Mats Rosenlund et al. 2008. “Comparison of regression models with land-use and emissions data to predict the spatial distribution of traffic-related air pollution in Rome”, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 18: 192-199.
  19. Michael Brauer et al., 2003. “Estimating Long-Term Average Particulate Air Pollution Concentrations: Application of Traffic Indicators and Geographic Information Systems”, *EPIDEMIOLOGY*, 14(2): 228-239.
  20. Minguez R, Montero JM, Fernandex-Aviles G., 2013. “Measuring the impact of pollution on property prices in Madrid: objective versus subjective pollution indicators in spatial models”, *J Geogr Syst*, 15(2): 169-191.
  21. Rijinders E., Janssen N., Van Vliet P., et al., 2001. “Personal and outdoor concentrations in relation to degree of urbanization and traffic density”, *Environ Health Perspect*, 109: 411-417.



22. Rouzbeh Shad et al., 2009. "Predicting air pollution using fuzzy genetic linear membership kriging in GIS" *Computers, Environment and Urban Systems* 33: 472-481.

23. Trauth, M. H., 2007, *MATLAB Recipes for Earth Sciences: Second Edition*, Springer Berlin Heidelberg NewYork.

24. Zev Ross, et al., 2006. "Nitrogen dioxide prediction in Southern California using land use regression modeling: potential for environmental health analyses", *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 16: 106-114

25. www.airkorea.or.kr

26. www.sgis.kostat.go.kr

27. www.oecd.org

Table 2. Criteria for calculating CAI

Category	A		B		C		D		E		F		
Description	Good		Moderate		Unhealthy for sensitive group		Unhealthy		Very unhealthy		Hazardous		
Value	IL	0	51		101		151		251		351		
	IH	50	100		150		250		350		500		
Concentration	BPL	BPH	BPL	BPH	BPL	BPH	BPL	BPH	BPL	BPH	BPL	BPH	
SO <sub>2</sub> (ppm)	1hr	0	0.02	0.021	0.05	0.051	0.1	0.101	0.15	0.151	0.4	0.401	1
NO <sub>2</sub> (ppm)	1hr	0	0.03	0.031	0.06	0.061	0.15	0.151	0.2	0.201	0.6	0.601	2
CO (ppm)	1hr	0	2	2.01	9	9.01	12	12.01	15	15.01	30	30.01	50
O <sub>3</sub> (ppm)	1hr	0	0.04	0.041	0.08	0.081	0.12	0.121	0.3	0.301	0.5	0.501	0.6
PM-10 (ug/m <sup>3</sup> )	24hr	0	30	31	80	81	120	121	200	201	300	301	600

$$I_p = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_p - BP_{LO}) + I_{LO}$$

I<sub>p</sub> : The air quality index for each target pollutant  
 C<sub>p</sub> : The rounded concentration of each target pollutant  
 BP<sub>HI</sub> : The breakpoint that is greater than or equal to C<sub>p</sub>  
 BP<sub>LO</sub> : The breakpoint that is less than or equal to C<sub>p</sub>  
 I<sub>HI</sub> : The index value corresponding to BP<sub>HI</sub>  
 I<sub>LO</sub> : The index value corresponding to BP<sub>LO</sub>

Appendix

Table 1. Variogram parameters for pollutant

	pm10	o3	no2	co	so2	
parameter	a	-6.60E-19	0.0001768	0.2439	3.504e-00	
	b	7.292e+004	7.95E-14	0.1525	6.294e+004	0.4094
	c	8.861e+004	-1.74E-09	-0.0005154	5.831e+004	-
	d	-	0.000127	-	-	-
function	Gaussian	cubic	Power	Gaussian	Power	
	$f(x) = a \times \exp\left(-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right)$	$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$	$f(x) = a \times x^b + c$	$f(x) = a \times \exp\left(-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right)$	$f(x) = a \times x^b$	
	r <sup>2</sup>	0.8158	0.6636	0.485	0.6515	0.6567
adj-r <sup>2</sup>	0.7851	0.5719	0.3992	0.5934	0.6303	

출처 : www.airkorea.or.kr

Date Received 2014-08-25  
 1st Reviewed 2014-09-21  
 Date Revised 2014-09-29  
 2nd Reviewed 2014-09-30  
 Date Revised 2014-10-16  
 Final Received 2014-10-27