

## 서울시 PM10 공간분포 분석과 시계열 변화

정종철<sup>1\*</sup>

### A Spatial Distribution Analysis and Time Series Change of PM10 in Seoul City

Jong-Chul JEONG<sup>1\*</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 서울에서 직경  $10\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지에 대한 공간분석을 수행하였다. PM10은 폐암과 질병에 의한 사망율을 증가시키는 주요 원인이기 때문에 PM10의 공간적 분포는 서울의 대기오염에서 중요한 관심 사항이다. 본 연구에서 PM10의 공간적 분포 분석은 2010년과 2011년 서울시 미세먼지의 월 평균자료에 의해 모니터링 되었다. PM10의 공간분포는 PM10의 공간 분포 특성을 잘 반영하는 IDW 방법을 적용하였고, PM10의 월 평균 공간분포는 서울시의 서부지역(영등포)이 초봄과 겨울철에 서울시의 북부지역 보다 높은 농도의 공간 분포를 나타내었다. 또한 2010년과 2011년 PM10 농도 분포의 비교에서 2011년 강남구와 송파구의 PM10 농도는 2010년 연평균 공간분포 보다 증가하였다. 서울시 PM10의 공간 분포가 영등포구, 강남구, 청량리 등 특정지역에서 높은 경향을 나타내고 있어서 이에 대한 관리방안의 수립이 요구된다.

주요어 : 미세먼지, 서울시, 공간분석, 공간보간법

#### ABSTRACT

In this study spatial analysis of PM10 was performed to Particulate Materials(PM) less than  $10\mu\text{m}$  in diameter in Seoul city. Because PM10 are responsible for the increasing mortality rate of lung cancer and cardiovascular diseases, spatial distribution of PM10 are special interest in air pollution of Seoul. In this study, spatial analysis of Particulate Materials were monitored by monthly averaged PM10 concentration of 2010, 2011. The monthly spatial patterns of PM10 showed the west area of Seoul(Youngdungpo) higher PM10 concentration than northern part of Seoul in early spring and winter seasons. In the comparison of PM10 concentration distribution patterns in 2010 and 2011, the PM10 concentration of 2011 at Gangnam and

2013년 11월 21일 접수 Received on November 21, 2013 / 2014년 1월 24일 수정 Revised on January 24, 2014 / 2014년 2월 3일 심사완료 Accepted on February 3, 2014

<sup>1</sup> 남서울대학교 GIS공학과 Department of GIS Engineering, Namseoul University

\* Corresponding Author E-mail : jjc1017@gmail.com

Songpa-gu were more increased than yearly averaged patterns of 2010. The distribution patterns of PM10 in Seoul city showed the high concentration PM10 of several areas with Youngdungpo-gu, Gangnam-gu and Cheongnyangni. Therefore we need to establish PM10 management strategy for these area.

**KEYWORDS :** PM10, Seoul City, Spatial Analysis, IDW

## 서론

최근 서울시의 PM10 농도는 급격히 증가하고 있는 추세이다. 이는 도로 교통량 증가로 인한 도심지의 미세먼지와 중국으로부터 유입되는 대기 중의 미세먼지 농도에 의한 영향으로 보고되고 있다. PM10은 가늘고 작은 먼지입자로 지름 10 $\mu$ m 이하인 먼지를 말하며, 공기 중 고체상태의 입자와 액적상태의 입자 혼합물을 미세먼지라고 한다. 이러한 미세먼지들은 자연 배출원 뿐만 아니라 여러 종류의 고정배출원이나 이동배출원으로 부터 배출되므로 황산염, 질산염, 암모니아 등의 이온성분과 금속화합물, 탄소화합물 등 유해물질로 이루어져 있으며, 다양한 배출원으로 부터 직접 배출되거나 아황산가스나 질소산화물과 같은 가스 상태 물질에 의해 2차적으로 생성된다(Simon *et al.*, 2008).

최근 서울시와 같은 광역 대도시 지역에서는 대기오염의 가장 중요한 원인물질로 PM10이 논의되고 있다. 특히 발생원에 따라 공사장, 학교운동장 등 자연적으로 발생하는 것과 자동차매연, 대규모 음식점 등 배출시설, 가정용 연료 연소 등 인위적인 활동에 의해 발생하는 PM10의 영향이 지역적으로 차이를 나타내고 있어서 PM10의 공간 분포 분석에 대한 연구가 필요한 시점이다.

우리나라에서 PM10에 대한 연구는 배출원의 파악과 인벤토리를 구축하여 배출량을 산정하고, PM10의 발생을 저감하기 위한 대기오염 정책적 방안을 제시하는 내용과 PM10 관리 기준에 따라 생활건강에 대한 역학적 조사 등의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 세계보건기구(WHO) 기준을 만족하는 PM10 관리 정

책과 연구를 추진하고 있음에도 불구하고(Ghim, 2012), 중국으로부터 유입되는 황사 등 서울시 PM10의 증가는 미세먼지에 민감한 어린이, 노약자들에게 치명적인 피해가 예상된다.

이에 따라 PM10에 대한 건강 및 위해성에 대한 관심이 증가하면서 서울시의 PM10 성분과 영향에 대한 연구가 추진되었고, 서울지역에서 PM10 농도를 분석하여 농도 분포를 제시하였으며(Park *et al.*, 2005), Park *et al.*, (2010)은 부산지역을 대상으로 PM10의 농도를 입자상의 특성에 의해 분석하였다. Han (2006)은 이동먼지측정시스템을 이용한 포장도로 Silt Loading의 시간적·공간적 변화특성에 관한 실시간 측정 자료를 통해 서울시와 인천시의 Silt Loading map을 작성하는 연구를 수행하였다. 이러한 연구들은 조사지점에서 관측된 PM10의 화학적 성분과 농도의 시간적, 계절적 변화 특성을 분석하였으나, PM10의 공간적인 분포와 시공간적 변화를 파악하는 부분에서는 아직 연구가 부족한 실정이다.

PM10의 공간적 분포 특성을 파악하기 위해서는 PM10 자동측정망에 의한 측정 자료를 파악하는 것이 요구된다. 우리나라의 미세먼지 측정은 1984년 주요 도시의 총먼지 오염도를 측정하면서 시작되었고, 인체에 미치는 영향이 큰 미세먼지(PM10)의 측정은 1995년부터 시작되었으나, 현재 공간분포를 조밀하게 파악하기 위한 관측지점의 부족으로 서울시 도시공간의 PM10 관리 정책을 추진하기 위한 공간분석 체계가 이루어지기에는 보다 유의한 측정자료 및 평가 분석방법의 개선이 필요하다고 판단하였다.

본 연구에서는 대기오염자동측정망의 측정망 지점에서 측정된 미세먼지 농도 데이터를 공간상 연속적으로 분포하는 특징으로 평가하여 공

간보간기법을 통해 서울시 지역별 PM10 농도를 분석하였다.

본 연구와 같이 미관측지점의 공간자료 분석을 위한 공간보간기법을 적용한 연구사례는 다음과 같다. Cho and Jeong(2006)은 기상청에서 운영하는 373개의 강우관측소 자료를 이용하여 가우시안함수를 사용한 일반크리깅에 의해 강우자료에 대한 공간보간기법의 적용이 효과적임을 제시하였고, Park and Jang(2008)은 수치표고모델과 다변량크리깅을 이용한 기온 및 강수분포도를 작성하여 공간보간에 의한 미관측 지역의 적용결과를 제시하였다. 특히 Park and Kim(2013)은 PRISM, 역거리가중법, 공동크리깅으로 작성한 1km 공간해상도의 남한 강수 자료에서 강수 분포의 비교를 통해 공간 보간 기법의 연구방법론을 평가하고 있어서 의미 있는 방법론을 제시하고 있으나, 본 연구에서 제시한 PM10과 같은 대기확산 오염물질의 적용사례는 부족한 실정이다.

또한 Zerrouqi *et al.*,(2008)는 주성분분석과 GIS기법을 적용하여 토양오염에 대한 공간 분석을 수행하여 지역적 토지이용의 배출원에 의한 확산범위를 평가하여 공간분석을 위한 GIS기법을 사용하였으나, 공간보간법의 적용을 비교하기에는 토양의 매체가 부적합한 것으로 판단되었다.

Cho and Jeong(2009)은 PM10 측정망 관측 자료를 바탕으로 서울시 토지이용 특성을 고려하여 PM10의 공간분포를 파악하였으며, PM10의 공간분포 특성상 점 측정 자료를 공간보간하여 미관측지점의 농도를 추정하는 것이 가능하다고 평가하였다. 그러나 PM10의 측정 농도는 측정지점의 발생원에 의해 가장 민감하게 영향을 받고 측정지점을 포함한 인근의 토지이용은 주택지, 농경지, 레저지역, 상업지역 등의 이용 형태에 따라 PM10의 발생량이 다르게 나타나는 특성을 가지고 있다. 특히 Kim *et al.*(2010)은 건축공사장, 나대지, 학교 운동장과 같은 토지이용과 도로 교통량의 이용 특성에 따라 배출원과 배출량의 경향이 다르게 나타나는 것으로 보고하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 서울시 PM10의 실시간 측정 자료를 일 평균, 월 평균 자료로 정제하여 서울시 PM10 시공간 분포 지도를 작성하고, 배출원 특성을 반영할 수 있는 PM10 측정지점 2km 이내 토지이용에 따라 나타나는 PM10의 시공간적 분포 특성을 분석하는데 있다.

## 연구방법 및 범위

본 연구에서는 그림 1과 같이 서울시 대기오염자동측정망의 측정망 지점에서 측정된 PM10 농도 데이터를 사용하여 PM10의 공간상 연속적으로 분포하는 특징을 평가하였다. 그림 2의 서울시 PM10 점 측정망에 의한 PM10의 측정 자료는 일 농도, 월 평균 농도, 연평균 농도 등 시간적 구분에 의해 측정 지역의 PM10 농도를 파악할 수 있지만, 측정점이 분포하지 않는 지역에 대해서는 공간내삽기법을 통해 PM10 농도를 분석하였다.

본 연구에서는 공간보간 기법으로 지역 경향면 모형, IDW(Inverse Distance Weighted), RBF(radial basis function), 크리깅(kriging) 방법(Johnston *et al.*, 2001) 중에서 IDW를 사용하여 공간분석을 하였다. 2000년부터 2005년까지 서울시 PM10 연평균 농도를 가지고 위의 4가지 공간분석기법을 적용하여 PM10의 분포 특성을 평가한 Cho and Jeong(2009)의 연구 결과에서는 PM10의 공간보간 기법으로 적용 방법에 따라 오차의 경향이 다르지만 IDW에 의한 거리가중합수를 고려하여 미측정지점의 농도를 평가하는 것이 PM10에 대해 유의한 결과를 나타내고 있다고 보고 하였다.

본 연구에서는 서울시 PM10 자동측정망에서 측정된 PM10 일 농도 자료를 이상치를 제거한 월 평균 자료로 생산하여 측정망 공간분석을 하였다. 서울시 대기환경자동측정망에서 측정되는 PM10 자료는 배출원 인벤토리와 배출 모델을 적용한 배출량 자료와 비교하여 측정점 농도의 유의성을 평가하였다.

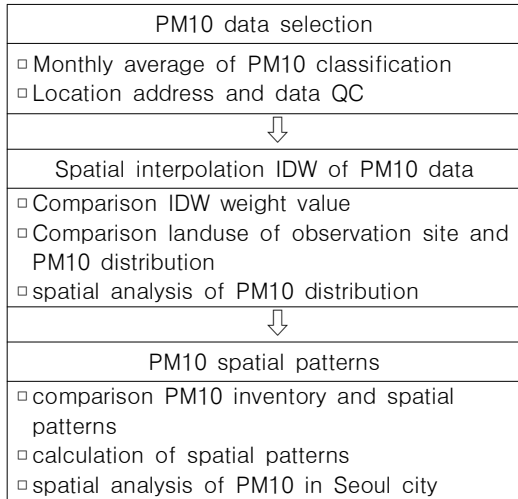


FIGURE 1. Study flow chart and spatial analysis methods of PM10



FIGURE 2. Study area and PM10 measuring sites of Seoul city

PM10 배출량 자료는 국립환경과학원 CAPSS에서 적용하는 인벤토리 모델을 적용하였는데(Fitz and Bufalino, 2002; Kim *et al.*, 2010), 이는 표 1과 같이 서울시 행정 구역 단위의 교통량, 인구활동, 나대지, 공사장 등 미세 먼지 발생원의 정량적 조사 자료를 기반으로 발생량을 추정된 결과이다.

TABLE 1. PM10 inventory and calculation methods for spatial landuse (Zerrouqi *et al.*, 2008)

Inventory source	PM10 calculation methods
construction area(acre)	1.2ton/acre/month
road length(km)	US EPA coefficient
playground	50% of school area
agriculture (km2)	US EPA coefficient

서울시 PM10 평균 농도는 2000년부터 2010년까지 지속적으로 감소하는 추세를 나타내고 있었으나, 2010과 2011년 지역별로 기준치 이상의 관측 일수가 증가하였다. 특히 강남구와 송파구 등 특정지역에서 PM10이 급격히 증가한 원인을 분석하기 위해 이들 지역을 대상으로 2010년과 2011년 PM10 농도를 측정할 자료를 바탕으로 공간분석 하였다.

PM10 농도의 공간보간에 의한 분석결과와는 2010년과 2011년도 PM10 농도를 분기별(계절별)로 비교 분석하여 특정 농도의 증가 지역이 계절적 영향에 의한 기상 특성인지 아니면 지역적 배출량 증가로 인한 원인인지를 분석하였다. 특히 지역적인 PM10 측정 농도 자료에 영향을 미칠 것으로 판단되는 측정망 주변지역의 토지이용을 2008년, 2010년, 최근의 다음 지도 항공사진 분석을 바탕으로 측정망 지역의 측정 농도와 토지이용을 비교하였다.

### 연구결과 및 고찰

PM10은 공기역학적 직경 10 $\mu$ m 이하의 입자를 나타내기 때문에 대기 중에서 쉽게 이동 및 확산될 것으로 판단되며(Kim *et al.*, 2010), 공간보간 결과는 측정망의 개별 정점 자료로부터 해석할 수 없었던 PM10 시공간분포 경향을 파악할 수 있었다.

본 연구에서 적용된 2010년과 2011년 PM10 공간분포에 의한 농도 분포결과는 다음과 같다. 그림 3부터 그림 6은 2010년 각 분기별 PM10의 공간분포를 나타낸 것이며, 그림 7부터 그림 10은 2011년 각 분기별 PM10의 공간분포를 나타낸 것이다. 1분기와 2분기는 황사에 의한 외부 영향으로 대체적으로 미세먼지의 농도가 높고 편서풍을 타고 날아오는 중국의 미세먼지에 따라 지역적으로 PM10 공간분포 경향이 다르게 나타날 것으로 예측하였으나, 월평균과 분기별 평균의 공간분포 경향은 영등포구가 2010년과 2011년 모든 계절에 높은 PM10의 분포를 나타내고 있다. 3분기는 대기의 확산이 강할 뿐만 아니라, 강우 빈도가 늦여름에 편중됨으로 인해 오염된 공기를 세정하는 효과가 있어 PM10 농도가 4계절 중 가장 낮은 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 그림 5와 그림 9처럼 영등포구와 신사동, 청량리지역은 상대적으로 높은 PM10 농도 분포를 나타내고 있다. 연중 PM10의 농도는 양천구, 서대문구, 종로구, 동작구, 금천구가 서울시 구별 중 가장 높고, 강동구가 가장 낮은 것으로 나타났다. 4분기는 에너지 사용량의 증가와 겨울철 고농도 스모그 발생으로 인해 다른 계절에 비해 PM10 농도가 상승했으며, 난방연료 사용에 따른 영향으로 대체적으로 높은 PM10 농도를 보여주고 있다. 그 중 특히 농도가 높은 지역은 강서구, 마포구, 영등포구, 관악구, 강남구이다.

본 연구에서는 서울시 PM10의 공간적 분포에 대한 2010년과 2011년의 분기별 비교를 통하여 연간 PM10의 공간적 분포에서 지역별 경향이 뚜렷하게 나타나는 것을 파악하였다. 특히 7, 8, 9월의 청정한 시기에도 서울시 PM10 공간 분포에서 특정지역의 분포가 우세하게 나타나는 것은 지역적 배출량과 배출원 특성이 크게 기여하고 있음을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

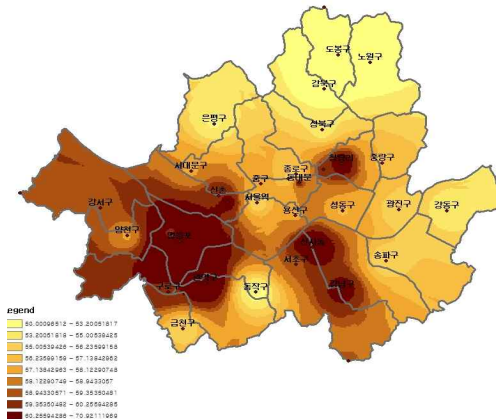


FIGURE 3. PM10 distribution map of first quarter of 2010

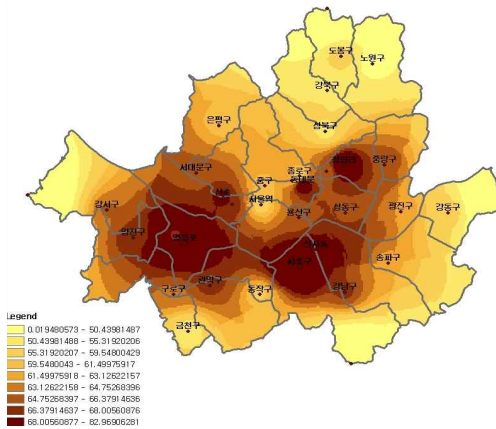


FIGURE 4. PM10 distribution map of second quarter of 2010

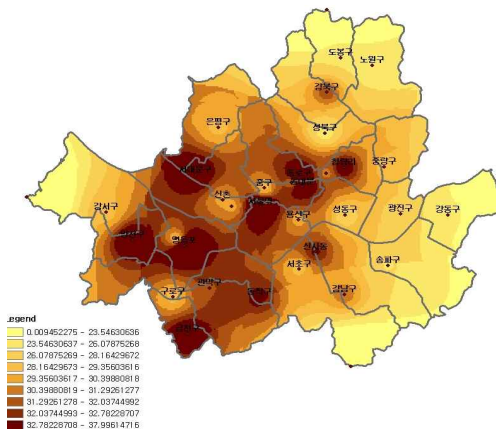


FIGURE 5. PM10 distribution map of third quarter of 2010

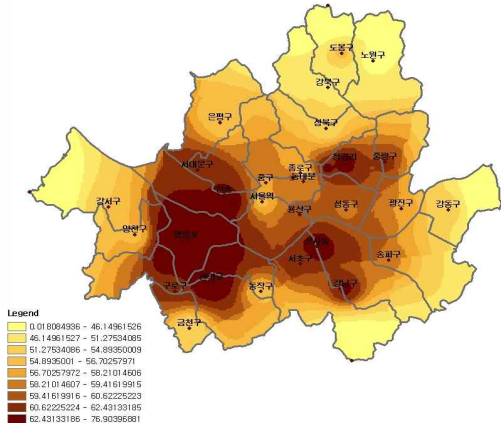


FIGURE 6. PM10 distribution map of last quarter of 2010

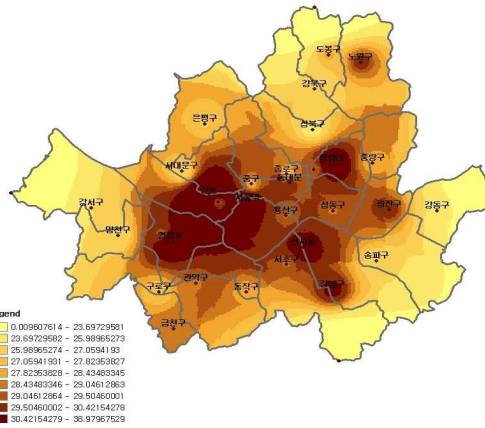


FIGURE 9. PM10 distribution map of third quarter of 2011

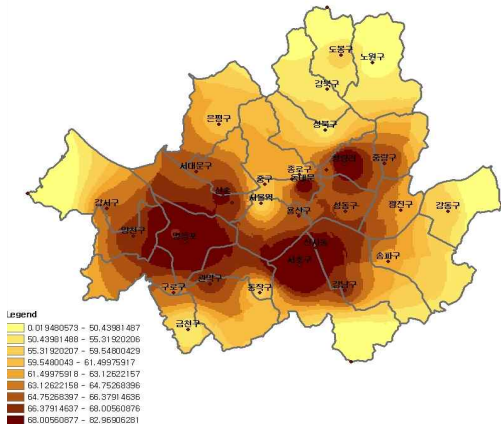


FIGURE 7. PM10 distribution map of first quarter of 2011

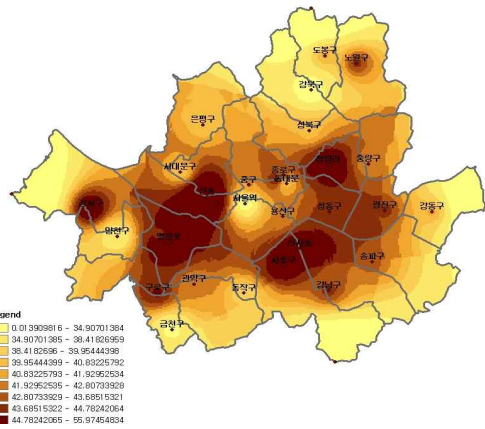


FIGURE 10. PM10 distribution map of last quarter of 2011

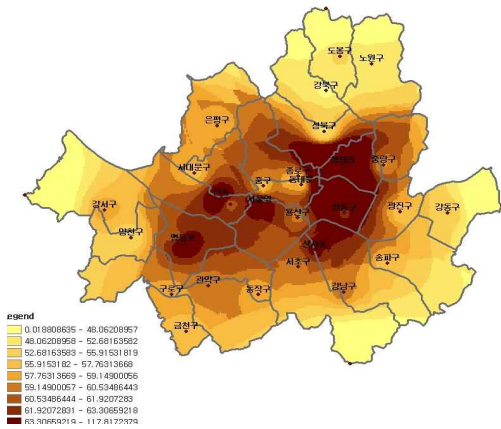


FIGURE 8. PM10 distribution map of second quarter of 2011

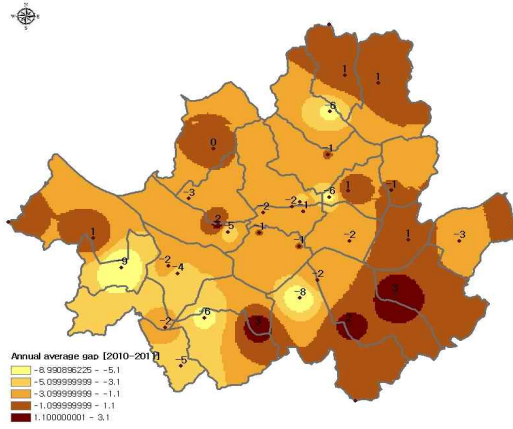


FIGURE 11. The difference of PM10 yearly average distribution map of 2010-2011



그림 11은 2010년과 2011년 측정망 자료의 PM10 연평균 변화를 비교한 것으로 강남, 송파구 지역이 2011년에 PM10 농도가 증가한 지역으로 나타나고 있다. 강남구와 송파구는 그동안 PM10 농도가 높지 않은 지역으로 관측되었기 때문에 이러한 측정망 결과에 대한 시공간적 분석은 의미 있는 결과라고 판단된다.

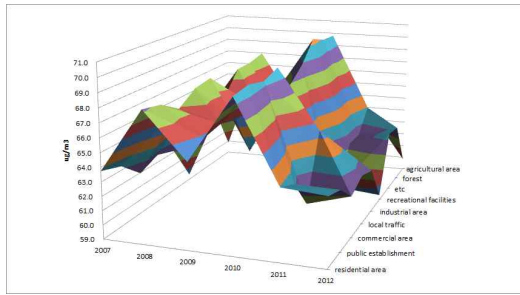


FIGURE 12. The comparison of landuse of observation site and yearly average distribution of PM10 concentration

PM10은 공기 중 비산과 이동이 용이하기 때문에 특정 배출원에 의한 영향이 지역적인 PM10 공간 분포의 경향으로 나타나고 있어서 PM10 발생 원인이 되는 배출원을 구분하고, 배출원으로 부터 발생량을 평가하는 모델을 비교하는 것이 요구되지만, 이는 자료의 수집과 처리 비용이 많이 요구되고 분석 결과가 측정망 자료와 불일치하는 경우 이를 해석하기 어려운 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 그림 12와 같이 2008년, 2010년, 최근의 다음지도 항공사진 분석을 통해 PM10 측정망이 위치한 지역의 토지이용 타입과 공간보간에 의한 PM10 연평균 농도 정보를 활용하여 측정망이 위치한 지역의 토지이용 타입에 따른 PM10 농도의 경향을 비교하였다.

측정망이 위치하는 지역 반경 2km의 공간적 특성은 거주지역과 레저지역, 산림, 농업지역의 PM10 공간분포가 낮은 농도의 경향을 나타내고 있으며, 교통이동, 공업지역 등은 PM10 공간분포가 높은 농도의 경향을 나타내고 있다.

강남구와 송파구의 경우 표 1의 발생원 구분과 발생량 산정으로 교통량 증가와 건설공사장의 증가에 의한 영향이 PM10 농도가 증가하는 주요 원인으로 파악된다.

서울시 PM10 배출량을 조사하여 평가한 결과는 강남, 서초, 송파, 영등포구의 PM10 배출량이 서울시 다른 구에 비해 높은 지역으로 보고되고 있어서, 본 연구의 결과와 유의미한 공간분포 경향이 있음을 알 수 있었다. 또한 PM10 중 비산먼지를 제외하여 평가한 경우 영등포구가 높은 배출량을 나타내고 있어서 영등포구 지역의 PM10 관리대책이 시급한 것으로 평가되었다.

### 결론

국내 PM10 연구는 PM10 발생요인을 관리하는 정책 제안과 함께 발생 원인별 배출량을 평가하는 방안에 대한 연구가 많은 부분 이루어졌다. 그러나 자동측정 및 이동측정망에서 측정되는 정보의 시공간분석기법을 개발하고 평가하거나 개선방향을 제시하는 연구는 부족하다고 판단하였다.


본 연구는 PM10 측정망 자료의 공간보간 방법에 의해 PM10 공간분포와 분기별 평가, 측정망 주변 토지이용 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 서울시 각 측정망의 공간분석을 통해 평가된 PM10은 겨울 > 봄 > 가을 > 여름 순으로 겨울에 가장 높은 PM10 농도를 나타내고 있고, 이러한 PM10 농도는 영등포와 청량리 등 교통 인구 밀집지역과 대규모 공사장이 위치하는 지역에서 높은 PM10 분포 경향을 나타내고 있다.

둘째, 서울시 PM10의 연간 변화 특성에서 PM10 공간적 분포에 대한 2010년과 2011년의 비교는 PM10의 공간적 분포에서 서울시 각 지역별 분포 경향을 잘 나타내는 것으로 판단되었다.

셋째, 서울시에서 PM10의 측정망 농도에 대한 시공간적 분포 특성의 원인을 파악하기 위

해 항공사진에 의해 배출원 특성을 파악하였고, 토지이용과 PM10 농도 공간 분포의 상호 경향을 해석 하였다.

본 연구를 바탕으로 향후 다음과 같은 연구 방향을 제시할 수 있다. 본 연구의 결과 서울시 PM10 측정망의 자료를 공간보간하여 미관측지점의 PM10 농도를 추정하는 것은 PM10의 시공간적 분포 변화를 파악하는데 의미 있는 결과를 제시하였다. 따라서 본 연구는 자동측정망 자료에 의한 공간보간기법의 적용으로 시간과 비용을 최소화하는 서울시 실시간 PM10 공간 분포정보를 서비스할 수 있는 시스템 구축 방안설계에 기초연구로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 

## REFERENCES

- Cho, H.L. and J.C. Jeong. 2006. Application of spatial interpolation to rainfall data. The Journal of GIS Association of Korea 14(1):29-41 (조홍래, 정종철. 2006. 강우 자료에 대한 공간보간기법의 적용. 한국GIS 학회지 14(1):29-41).
- Cho, H.L. and J.C. Jeong. 2009. The distribution analysis of PM10 in Seoul using spatial interpolation methods. Journal of Environmental Impact Assessment 18(1):31-39 (조홍래, 정종철. 2009. 공간보간기법에 의한 서울시 미세먼지(PM10)의 분포 분석. 환경영향평가학회지 18(1):31-39).
- Fitz, D.R. and C. Bufalino. 2002. Measurement of PM10 emission factors from paved roads using on-board particle sensors. Proceedings of the U.S. Environmental Protection Agency 11th International Emission Inventory Conference, Atlanta, GA, April 2002.
- Ghim, Y.S. 2012. Proposal for air quality improvement and green growth in the Seoul metropolitan area of the 21st century. Journal of Atmospheric Environment 28(2) :109-118.
- Han, S.H. 2006. A study on the real-time measurement for temporal and spatial variations of paved-road silt loading using the mobile dust monitoring system. Master Thesis, Univ. of Inha, Korea, 76pp. (한세현, 2006. 이동먼지측정시스템을 이용한 포장도로 Silt Loading의 시간적·공간적 변화특성에 관한 실시간 측정 연구. 인하대학교 대학원 석사학위논문. 76쪽).
- Johnston, K., J.M. Ver Hoef, K. Krivoruchko and N. Lucas. 2001. Using ArcGIS Spatial Analyst. ESRI Press.
- Kim, D.G., H.A. Jin, S.B. Lee, Y.S. Ryu, D.G. Lee, K.H. Kang, J.H. Lim, Y.D. Hong, J.H. Lee, K.M. Lee, S.J. Lee and S.J. Lee. 2010. A study on the improvement of emission estimate methods for the air pollutants. Climate Change Research Division Climate and Air Quality Research Department National Institute of Environmental Research(NIER NO. 2010-99-1274), 38pp. (김대근, 진형아, 이수빈, 유영숙, 이대균, 강경희, 임재현, 홍유덕, 이주형, 이경미, 이승준, 이석조. 2010. 대기오염물질 배출량 산정방법 개선 연구. 기후대기연구부 기후변화연구과 국립환경과학원 연구보고서(NO. 2010-99-1274). 38쪽).
- Park, E.J., M.S. Kang, D.E. You, D.S. Kim, S.D. Yu, K.H. Chung and K.S. Park. 2005. Health risk assessment of heavy metals in fine particles collected in Seoul metropolitan area. Journal of the Environmental Health and Toxicology 20(2):179-186 (박은정, 강미선, 유대은,



- 김대선, 유승도, 정규혁, 박광식. 2005. 서울 북부 지역 미세입자에 함유된 유해 중금속의 분석 및 건강위해성평가. 환경독성학회지 20(2):179-186).
- Park, G.H., J.G. Jo and B.S. Ryu. 2010. Evaluation of pollution characteristics and chemical composition of PM2.5 in ambient air in Busan. The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment 20(1):154-167 (박기형, 조정구, 류병순. 2010. 부산시 대기 환경에서 PM2.5의 오염 특성과 화학적 조성 평가. 부산광역시 보건환경연구원보 20(1): 154-167).
- Park, J.C. and M.K. Kim. 2013. Comparison of precipitation distributions in precipitation data sets representing 1Km spatial resolution over South Korea produced by PRISM, IDW and Cokriging. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 16(3): 147-163 (박중철, 김민규. 2013. PRISM, 역거리가중법, 공동크리깅으로 작성한 1km 공간해상도의 남한 강수자료에서 강수분포의 비교. 한국지리정보학회지 16(3):147-163).
- Park, N.W. and D.H. Jang. 2008. Mapping of temperature and rainfall using DEM and multivariate kriging. Journal of the Korean Geographical Society 46(6):1002-1015 (박노욱, 장동호. 2008. 수치표고모델과 다변량크리깅을 이용한 기온 및 강수분포도 작성. 대한지리학회지 46(6):1002-1015).
- Simon, H., D.T. Allen and A.E. Wittig. 2008. Fine particulate matter emissions inventories: comparisons of emissions estimates with observations from recent field programs. Journal of the Air & Waste Management Association 58(2): 320-343.
- Zerrouqi, Z. M. Sbaa, M. Oujidi, M. Elkharmouz, S. Bengamra and A. Zerrouqi. 2008. Assessment of cement's dust impact on the soil using principal component analysis and GIS. International Journal of Environmental Science & Technology 5(1):125-134.