

서울지역 미세먼지의 실시간 고해상도 모니터링 방안

강 두 수¹⁾ · 봉 춘 근²⁾ · 김 대 성^{3)*}
¹⁾(주)센트리, ²⁾그린솔루스, ³⁾(주)태원시바타

(2019년 6월 24일 투고, 2019년 6월 27일 수정, 2019년 6월 28일 게재확정)

Real-time High Resolution PM Monitoring in Seoul

Doo Soo Kang¹⁾ · Choon Keun Bong²⁾ · Dae Seong Kim^{3)*}
¹⁾Sentry Inc., ²⁾GreenSolus Co, ³⁾Taewon SIBATA

(Received 24 June 2019; Revised 27 June 2019; Accepted 28 June 2019)

Abstract

Since existing measurement sites are required to construct a high-cost PM measuring device and a measuring site of a large area, there is a limit to the construction of a high-resolution measurement network. Therefore, it is necessary to develop a low-cost, high-performance PM measuring device (as an alternative technology) that can increase the resolution of PM measurement, and it is necessary to establish a base to provide real-time PM information for whole people. Therefore, in this study, the alternative technique (light scattering method) for achieving the above object was examined, performance evaluation was carried out, and it was verified that the light scattering method was usable. Various PM measurement results were compared and analyzed to find PM monitoring points and resolutions we would like to propose.

Keywords: PM₁₀, PM_{2.5}, Real-time monitoring, High resolution PM monitoring, Aerosol measurement

1. 서론

분진은 입자의 크기에 따라 대기 중 떠다니는 모든 입자상물질을 의미하는 총부유분진(TSP, Total

Suspended Particles), 공기역학적 직경이 10 μm 보다 작은 미세먼지(PM₁₀)와 직경이 2.5 μm 보다 작은 초미세먼지(PM_{2.5})로 나뉜다. 미세먼지가 사람의 머리 카락 지름(50~70 μm)보다 약 1/5 ~ 1/7 정도로 작은 크기라면, 초미세먼지는 머리카락의 약 1/20~1/30에

* Corresponding author.
Tel : +82-10-6788-8929
E-mail : dskim94@hanmail.net

불과할 정도로 매우 작다. 이처럼 초미세먼지는 눈에 보이지 않을 만큼 매우 작기 때문에 대기 중에 장기간 머물러 있다 호흡기를 거쳐 폐 등에 침투하거나 혈관을 따라 체내로 이동하여 들어감으로써 건강에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다(Kwon et al., 2012).

세계보건기구(WHO, 2005)는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})에 대한 대기질 가이드라인을 1987년부터 제시해 왔고, 2013년에는 세계보건기구 산하의 국제암연구소(IARC)에서 초미세먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1)로 지정하였다(IARC, 2013). 따라서 발암물질로 지정된 초미세먼지효율적인 관리가 필요한 실정이다.

매년 서울시의 미세먼지 경보 발생횟수는 지속적으로 증가하고 있으며, 수도권을 포함한 부산, 울산 등 주요 대도시에서도 미세먼지 농도는 증가하고 있다. 미세먼지에 대한 국민적 불안감 증대로 국내 미세먼지 농도에 대한 정보 및 대책을 요구하고 있다(Technology Trend Report of the Korea Environmental Industry & Technology Institute, 2014). 현재 서울시에 구축되어 있는 미세먼지 측정소는 도시대기 25개소, 도로변대기 14개소, 도시 배경, 경계 6개소, 총 45개 측정소로 측정소 한곳이 너무 넓은 지역을 대표하고 있어 미세먼지 모니터링 측정소가 부족한 실정이다. 현재의 측정소로는 학교, 도로변, 주택 등 수요자들에 맞는 정보제공이 어려울 뿐만 아니라 측정 해상도가 낮아 지점별 농도의 정확도에 오차가 크다.

기존 측정소는 고가의 미세먼지 측정기와 일정한 면적의 측정소 건축이 요구되어 고해상도 측정 망 구축에 한계가 있으므로 기존 측정방법을 대체할 대안 기술이 필요하며, 이에 따른 검증이 요구된다. 따라서 미세먼지 측정 해상도를 높일 수 있는 저비용, 고성능의 미세먼지 측정 대체기술 개발 필요하며, 전 국민이 체감할 수 있는 실시간 미세먼지 정보 제공 기반의 구축이 필요하다. 이에 본 연구에서는 상기 목적달성을 위한 대안기술(광산란법)을 검토하고, 성능평가를 진행하여 활용가능 여부 등을 확인하였으며, 다양한 미세먼지 측정 결과 비교 및 분석을 통해 미세먼지 모니터링 지점 및 해상도 등을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 고해상도 모니터링을 위한 대안기술을 검토하고자, 미세먼지 공정시험법으로 지정되어 있는 베타산흡수법(Dempsey and Polinshuk, 1966; Wedding and Weigand, 1993; Park et al., 2001)과 광산란방식 측정기(Kim et al., 2014; Kang et al., 2018a)를 동시 측정하고 그 성능을 비교 하였다.

이를 위해 서울시에 위치한 도시대기 측정소에 설치된 공인된 장치를 기준으로 하고 광산란방식 미세먼지 측정기를 설치, 측정 데이터를 수집 및 분석하였다. 1차 측정 분석 기간은 2017년 6월 2일 ~ 6월 18일로 17일간 연속측정으로 진행하였으며 광산란방식 측정기는 국내 센트리사의 실외용 미세먼지 측정기(SENTRY Dust Monitor)를 사용하였다.

2차 측정 분석 기간은 2017년 09월 21일 ~ 11월 24일로 약 2개월간 측정을 진행하였으며 미세먼지의 이동에 장애물이 될 수 있는 장치는 최대한 배제하고 설치하였다. 2차 테스트에 이용한 장치는 1차 테스트에 이용한 장비와 동일하며 지역별 특성에 따른 미세먼지 농도 변화경향 등의 파악을 위해 이용될 장치를 모두 설치하여 장치간 오차 등도 동시에 확인하고자 하였다.

위치적 특성(거리) 외 지역적 특성과 미세먼지 농도와의 상관관계를 확인하기 위해 서울시 대기 측정소는 종로구(도시대기) 측정소, 종로(도로변) 측정소를 이용하는 것으로 하였다. 해당 지역에는 타 지역에 비해 대기 측정소가 많이 위치하여 공인된 자료의 활용이 가능하고, 도로, 공원(녹지), 주택가, 학교 등이 비교적 다양하게 분포되어 있어 특성 및 농도 상관관계 분석 및 데이터 활용이 원활할 것으로 판단되어 선정하였으며 다음 그림과 같이 종로구 도시대기 측정소를 기준으로 반경 3 km 이내에 위치한 공원, 학교, 주택가를 대상으로 섭외를 진행하고자 하였다.

서로 다른 지점에 미세먼지 측정기를 설치하고 지역적 특성과 미세먼지 농도와의 상관관계를 분석하기 위해 총 5대의 광산란방식 측정기가 필요하며, 이를 위해 장비간 오차 실내 테스트를 진행하였다. 그림 1과 표 1은 광산란식 측정기의 설치 위치와 주변 특징을 각각 나타낸다. 또한, 현장 설치에 앞서 실내테스트를 통과한 5개의 광산란식 측정기



Fig. 1. PM monitoring devices installation location.

Table 1. Characteristics of the installation location.

Monitoring site	Straight distance	Characteristics	Remarks
Urban atmosphere monitoring site	Jongno-gu monitoring site	-	Community centre
Road side monitoring site	Jongno monitoring site	750 m	30 m nearby parks
Park	N park	930 m	500 m nearby subway station Large apartment complex within 300 m School within 300 m
Residential area	C Apartment	1.6 km	200 m nearby subway station Park within 500 m (green area)
School	N Elementary School	2.1 km	100 m nearby subway station Mountains within 500 m

에 대해 중로구 측정소에서 장비간 오차에 관한 실외테스트를 수행하였으며, 실외테스트를 최종으로 통과한 장치를 대상으로 현장에 설치하고 지역 특성별 미세먼지 농도와 비교하였다.

실내테스트에서는 모든 광산란식 측정기를 하나

의 챔버에 넣어두고 1주일간 농도 변화를 확인하면서 2번에 거쳐 장비간 편차를 확인하였고, 실외테스트에서는 중로구 측정소의 한 지점에 7대의 광산란식 측정기를 설치하고 5일간 농도 변화를 확인하면서 장비간 편차를 확인하였다.

또한 본 연구에서는 지리정보시스템(이하 GIS)의 공간 분석 기법 중 보간 기법 또는 도구를 사용하여 적정한 공간 해상도를 가지는 모니터링 지점들의 분포와 해상도를 제안하고자 크리깅(Kriging) 보간법을 활용하였다. 크리깅은 데이터에서 공간적으로 연관된 거리나 방향성을 파악할 때 양질의 표면을 생성하는 기술로 주로 토양학이나 지질학에서 많이 사용된다. 크리깅은 관심있는 지점에서 특성치를 알기 위해 이미 그 값을 알고 있는 주위의 값들의 선형 조합으로 그 값을 예측하는 지구통계학적 기법이다. 이 방법은 보간을 위해 주위의 실측 값을 선형으로 조합하며, 이러한 통계학적인 방법을 이용하여 값을 추정한다. IDW가 실측점 사이의 값을 추정하는 것에 비해 크리깅은 주변의 많은 측정 값을 통계적으로 분석하여 값을 추정한다. 즉, 값을 추정할 때 실측 값과의 거리 뿐만 아니라 주변에 이웃한 각 측정 값 사이의 상관 강도를 반영한다. IDW는

소지역에서 뚜렷한 지역차이를 나타내고 있는 반면, 크리깅은 소지역에서 지역차이가 뚜렷하지는 않지만 전체적인 경향을 파악하기에는 유리하다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대안기술(광산란 측정기) 비교 평가 결과 및 활용 방안

그림 2는 도시대기측정소(종로구)와 해당 위치에 설치한 광산란 측정기의 측정결과 데이터를 비교한 것으로 일부 데이터가 다수 누락된 시간을 제외하고 5일간의 데이터를 분석하였다. 그 결과 경향성은 비교적 유사한 것으로 확인되었으며 일부(우천)의 경우 변동폭이 큰 것으로 나타났다(그림 2의 직사각형 표시 부분).

이는 강우 초기에는 미세수분 발생 및 입자의 날

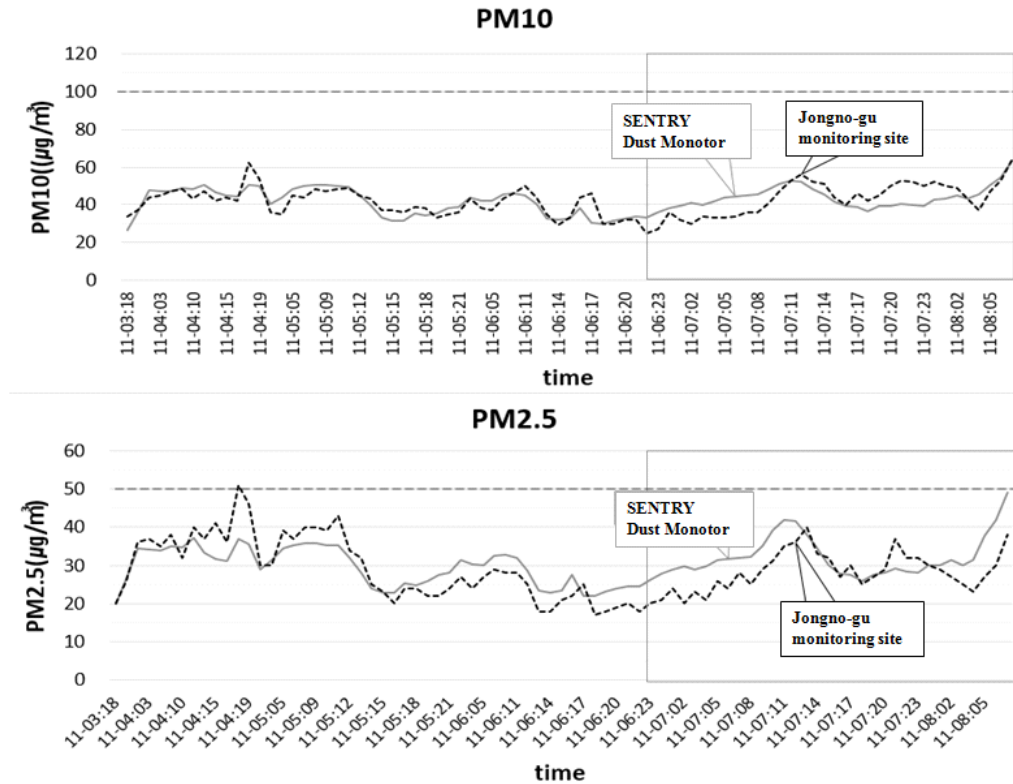


Fig. 2. Measurement results of PM₁₀ and PM_{2.5}.

림으로 미세먼지의 농도가 증가하여 농도가 높아지다가 강우 중기 이후에는 먼지입자가 수분과 결합해 중력에 의해 침강하여 농도가 낮아지는 것으로 판단되었다. 본 경향에 대한 정확한 파악을 위해 추후 강우상황에 따른 미세먼지 농도 변화에 대한 테스트를 진행하고 구체적인 데이터 분석을 추가로 진행하였다.

광산관법으로 측정된 수치는 미세먼지의 중량을 이용한 농도 값이 아닌, 미세먼지의 개수 및 산란량을 이용하여 보정계수(factor)를 구하여 계산한 상대적인 값이다. 보정계수란, 미세먼지 농도의 절대값이 측정되는 것이 아니라 미세먼지 입자 개수를 측정하는 광산관법의 한계를 극복하기 위한 숫자로, 해당 환경에서의 미세먼지 입자밀도에 해당한다(Kim et al., 2014). 이에 측정된 값은 절대값이 아니며, 미세먼지의 입자밀도에 따라 상대적으로 많은 차이를 나타낸다. 광산관법은 다양한 간섭 요인으로 인하여 지역, 장소, 계절에 따라 상이한 차이를 나타낸다.

이러한 간접측정 방식은 중량법에 비해 과대측정되는 경향이 있으며, 여기에는 먼지의 밀도와 습도 조건이 크게 작용한다. 광산관 측정기에서 먼지농도가 과대 측정되는 이유는 측정되는 에어로졸의 밀도, 굴절률, 형태, 크기 및 크기분포에 대한 복잡한 미 산란 특성에 기인한다(Branis, 2006; Day et al., 2011). 미세먼지 시료 중의 응축성 수분 물질의 영향을 제거하기 위한 전처리 장치는 시료를 가온하여 상대습도를 낮추는 방식과 시료의 회석을 통해 습도를 낮추는 방식이 적용될 수 있다(Kang et al., 2018b).

이에 본 연구에서는 광산관 방식 미세먼지 측정기기의 적용성 검토를 위해 기존 도시대기 측정소(종로구)에 광산관 방식 측정기기를 설치하고 5일간 데이터를 수집, 측정망 자료와 측정 데이터를 비교, 분석하였다. 그 결과 미세먼지 농도의 증감에 대한 경향성은 PM_{2.5}, PM₁₀ 모두 유사한 것으로 확인되었으며 강우상황 및 저농도, 고농도 구간별 보정만 적용하면 비교적 신뢰도 높은 미세먼지 측정장치로 활용 가능할 것으로 판단된다.

3.2. 고해상도 미세먼지 모니터링 구축 방안

고해상도 미세먼지 측정기를 설치하여 운용하게 되면 발생하는 측정 데이터를 실시간으로 수집하고

관리하는 기능이 요구되며, 이를 위한 자료 수집과 관리가 가능한 실시간 관리시스템을 구축하는 것이 필요하다. 실시간 관리시스템은 고해상도 미세먼지 측정 데이터를 수집하고 전송, 분석, 관리하는 기능과 기존 서울시 측정정보를 연계하여 구축하는 기능으로 구성된다.

실시간 관리 시스템은 측정기의 측정 데이터를 수집하여 서버로 전송하여 측정자료 DB를 구축하는 부분과 구축된 측정자료 DB를 관리하고, 구축된 자료를 이용한 분석 및 통계 자료를 생성하는 부분으로 구성된다. 측정기는 고정형과 이동형으로 구성되며, 각 설치 상황에 맞는 통신장치가 추가로 설치되어 DB 서버와 통신할 수 있다. 구축된 측정자료 DB를 활용하여 미세먼지 현황 자료를 웹 또는 스마트폰 앱을 이용한 서비스가 가능하며, 고해상도 미세먼지 측정 데이터를 활용할 수 있는 서비스를 추가해야 필요가 있다.

고해상도 미세먼지 측정기를 생성되는 측정 데이터를 실시간 수집 및 분석하기 위해서는 미세먼지 측정기에 측정 데이터를 디지털 수치로 변환하여 DB 서버로 전송하는 모듈이 탑재되어야 한다. 고정된 측정소 또는 측정기의 경우 측정기에 데이터 수집과 전송 모듈을 탑재할 수 있으며, 이동형 측정기의 경우는 데이터 수집 기능 외에 무선 데이터 전송을 위한 WiFi 또는 LTE 통신모듈이 함께 장착되어야 한다. 이러한 통신 모듈을 통해서 측정기에 장착된 데이터 전송 Firmware를 통해서 측정기의 측정 데이터를 정해진 측정자료 DB 서버에 전송할 수 있다. 측정기에서 서버로 전송되는 측정 데이터는 그 자체 측정 자료뿐만 아니라 측정 상황 정보를 담은 메타데이터도 함께 전송되어 측정값의 신뢰도를 분석할 수 있는 자료로 활용한다.

고해상도 대기질 측정 데이터의 효율적인 관리를 위하여 자료관리 시스템을 도입해야 한다. 자료관리 시스템은 측정 데이터가 수집되어 전송되는 자체 측정값 뿐만아니라 측정데이터가 측정되어 데이터가 전송되는 일련의 과정에 대한 정보를 함께 관리할 수 있는 기능을 보유하고 있어야 한다.

3.3. 지역적 특성 고려 방안

미세먼지 모니터링 지점 및 해상도 제안을 위해 기존 미세먼지 측정망 자료를 활용하여 측정소의



Fig. 3. Installation location map of Seoul air pollution monitoring stations and air pollution display panels.

위치 및 지역적 특성을 파악하고 측정망 자료 분석을 진행하였으며, 분석을 통해 지역적 또는 위치적 특성의 영향인자를 확인하였다. 또한, 도시대기/도로변 측정소, 주택가, 학교, 공원 등 특성이 비교적 뚜렷한 지점에 측정기를 설치하고 특성별 농도발생 및 변화 특성을 파악하여 미세먼지 모니터링지점 선정에 활용하고자 하였다.

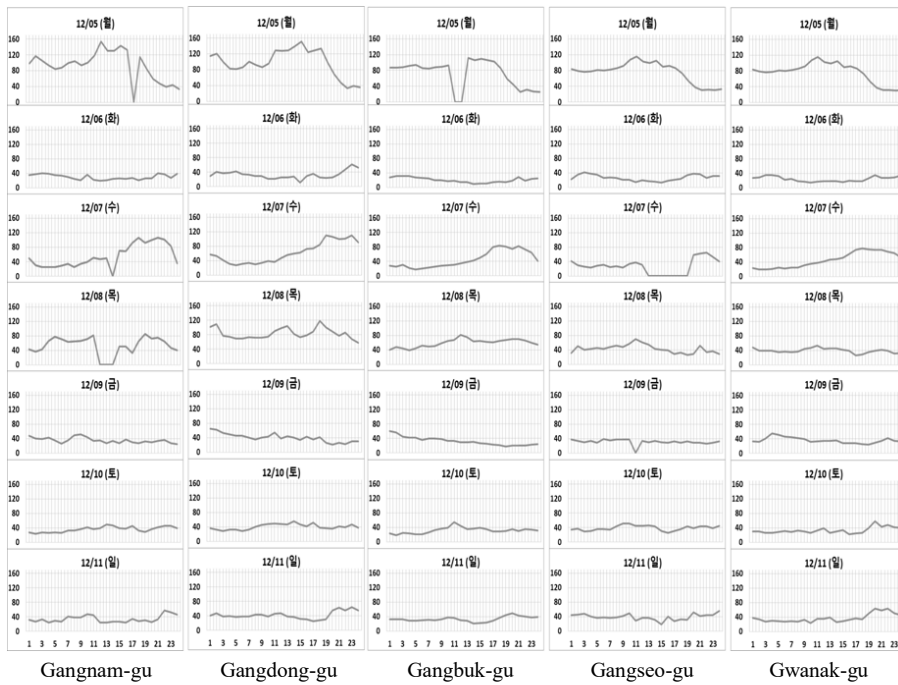
그림 3과 같이, 기존 측정소(도시대기 25개소, 도로변대기 14개소)의 위치 및 측정소 간 지역적 특성 데이터 수집 및 조사하고 미세먼지 측정 결과를 분석하여 특성에 따른 농도 변화 추이 등을 확인하였다. 수집 데이터를 통한 동일 시간대 측정소별 농도차 분석 및 도시대기 및 도로변 대기 측정소 농도차 분석 진행을 통해 유사성 및 차이점을 파악하고 지역적 특성과 미세먼지 농도 변화 경향성의 상관관계를 파악하고자 하였다. 도시대기 측정소 주변에는 도로가 인접한 경우가 가장 많았으며, 공원 등의 녹지, 학교도 근접한 측정소가 많은 것으로 확인되었다. 그러나 주택가와 인접한 측정소는 많지 않은 것으로 나타났다.

그림 4는 도시 대기 측정소와 도로변대기 측정소의 PM₁₀ 농도 변화 경향을 나타낸 것이다. 도시 대기 측정소의 PM₁₀, PM_{2.5} 확정자료 중 2016.12.05.

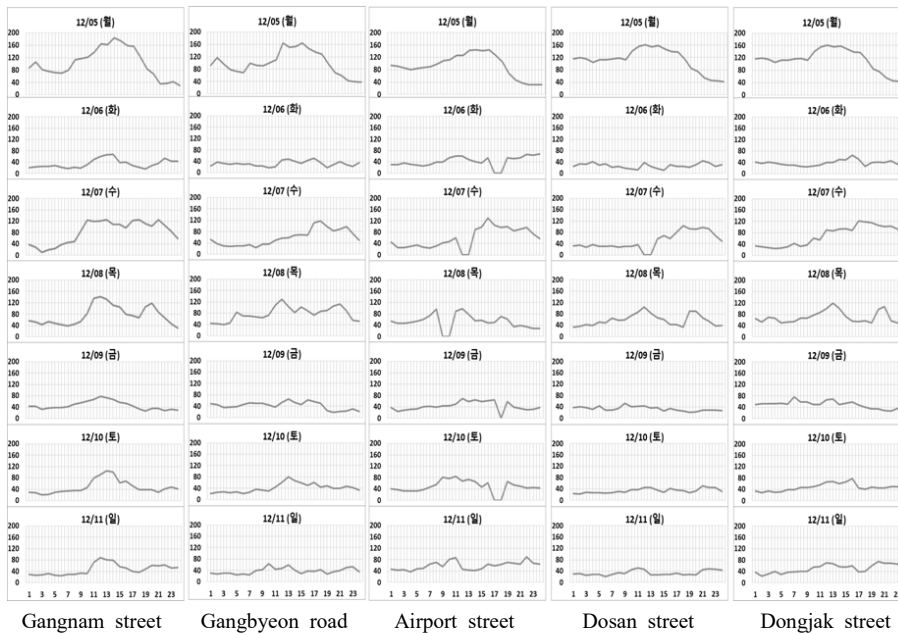
(월)~11(일) 까지 일주일간의 농도변화를 살펴본 결과 데이터가 누락된 부분을 제외하고 측정소간 거리별/용도별 경향성은 유사할 수 있으나 농도의 차이가 있음을 확인할 수 있다. 도로변 대기 측정소의 PM₁₀ 확정자료 중 2016.12.05(월)~11(일)까지 일주일간의 PM₁₀ 농도변화를 살펴본 결과 도로변 측정소라는 공통된 지역적 특성의 영향으로 농도는 차이가 있는 것으로 확인되었다. 본 결과를 통해서도 측정소의 지역적 특성은 미세먼지 농도에 큰 영향을 미치는 것을 파악할 수 있다.

현재 기존 측정망 간 거리가 비교적 가까운 일반 대기측정소(중구), 도로변대기측정소(한강대로), 배경농도측정소(남산)의 동일시간 미세먼지 농도를 확인해본 결과, 각 측정소간 직선거리가 평균 1.5 km로 근거리임에도 불구하고 동일시간대 미세먼지의 농도차가 PM₁₀의 경우 9 ~ 45 μg/m³, PM_{2.5}의 경우 3 ~ 23 μg/m³가 차이 나는 것으로 확인되었다.

이처럼 근거리임에도 불구하고 용도별로 미세먼지 농도가 다르거나, 원거리의 경우 용도가 같아도 미세먼지 농도가 다를 수 있으며, 본 데이터를 토대로 농도 특성이 다른 지점의 현장조사를 통해 측정소 주변 상황을 파악하여 미세먼지 측정소 위치 선정에 활용하고자 하였다.



(a)



(b)

Fig. 4. Trends of PM₁₀ concentration in urban atmosphere monitoring sites (a) and roadside atmosphere monitoring sites (b).

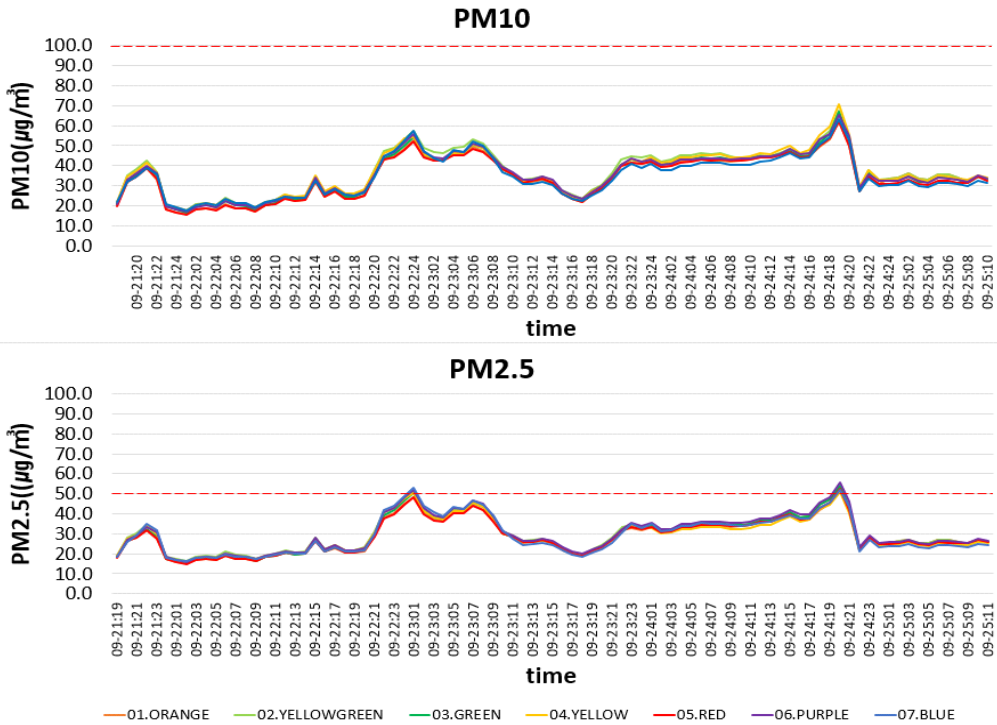


Fig. 5. Outdoor test results for errors between PM monitoring devices.

3.4. 지역적 특성과 미세먼지 농도 상관관계 분석

1, 2차 실내 테스트를 걸쳐 선정된 7대의 장치의 실외에서의 측정 기기간 오차를 확인하고자 종로대기측정소에 장치를 설치한 후 5일간 실외 테스트를 진행하였다. 그림 5와 같이 테스트 결과, 선정된 장치의 측정결과의 표준편차는 PM₁₀의 경우 최대 8.3%, 최소 2.4%, 평균 5.2%로 나타났으며, PM_{2.5}의 경우 최대 7.7%, 최소 1.5%, 평균 4.1%로 장비간 오차가 미세한 것으로 나타나 최종적으로 현장 테스트에 적용 가능한 것으로 판단되었다.

그림 1과 표 1을 보면 알 수 있듯이, 종로구 도시 대기 측정소를 기준으로 반경 3 km 이내에 위치한 공원, 학교, 주택가를 대상으로 설치를 진행하고자 하였으며, 현장 확인 결과, 측정 거부 의사를 밝힌 곳을 제외하고 종로구(도시대기) 측정소, 종로(도로변) 측정소, N 공원, C 아파트, N 초등학교를 측정 대상으로 선정하여 실내외 테스트를 통과한 5대의 광산란 측정기를 설치하여 미세먼지 농도를 측정하였다.

각 지점별 측정 비교 결과, 종로측정소 결과에 비해 전반적으로 도로변 미세먼지 농도는 높았으며, 공원의 미세먼지 농도는 비교적 낮은 것으로 나타났다. 학교와 주택가의 농도 경향성이 거의 일치하는 것으로 확인되었다. 그림 6은 각각의 측정 지점별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 시간별 측정 결과를 나타낸 것이다.

그림 7은 종로구 미세먼지 농도 측정결과를 분당/시간평균/일평균 그래프로 나타낸 것이다. X축인 시간의 간격이 늘어날수록 그래프가 완만해지는 것을 확인할 수 있었다. 광산란 측정기를 통해 미세먼지 농도를 측정한 결과, 분당 미세먼지 농도는 큰 폭으로 변화하고 있으나, 현재 국가 공인 측정소의 경우 중량법 또는 베타선흡수법을 사용기 때문에 시간평균 또는 일평균 자료만을 제공하고 있어 실시간 미세먼지 농도를 확인하기에는 어려운 점이 있다. 따라서 차후 실시간 미세먼지 데이터를 확보하기 위해서는 광산란 방식이 적용 될 수 있을 것으로 판단된다.

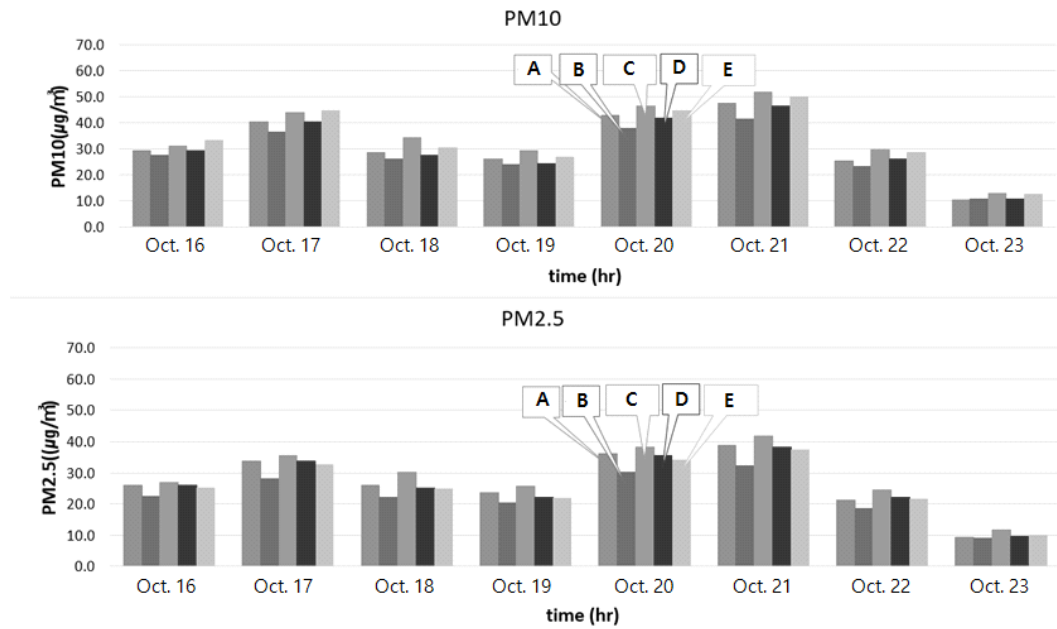


Fig. 6. PM measurement results by monitoring sites (A: Jongno, B: Park, C: Road side, D: School, and E: Residential area).

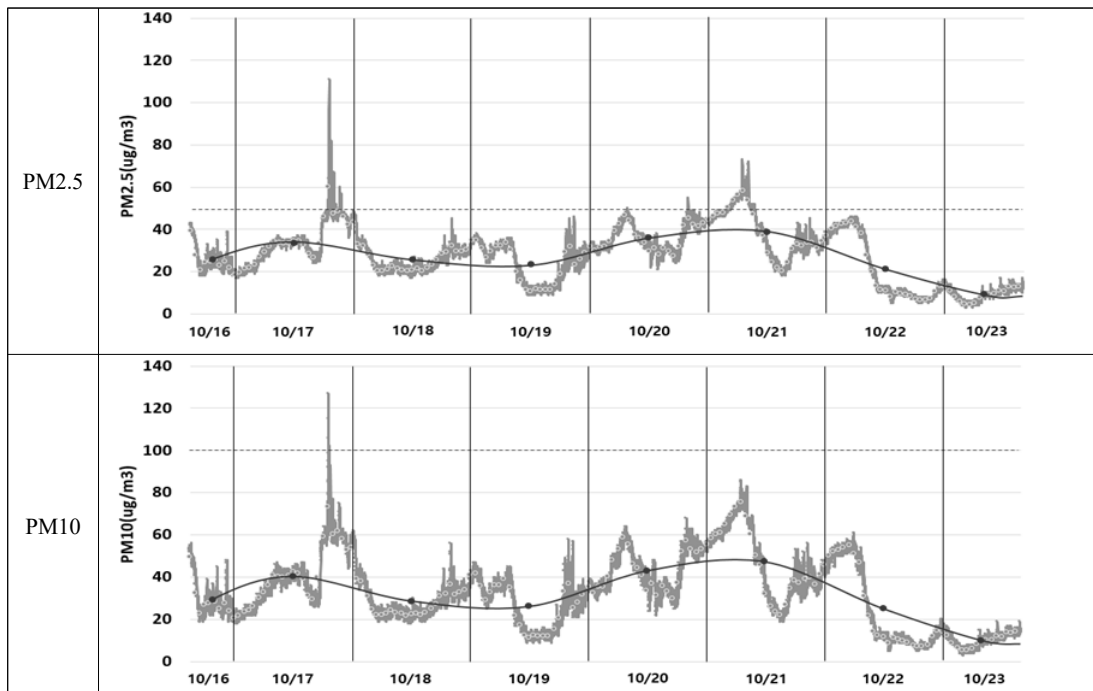


Fig. 7. PM measurement results of the Jongno monitoring site (min. vs hr vs daily average).

3.5. GIS 기법을 이용한 고해상도 미세먼지 모니터링

본 연구에서는 서울시 미세먼지 측정점의 적정함 분포를 파악하기 위해 여러 GIS 보간 기법 중 서울시 미세먼지 측정값의 전체적인 경향을 파악하기에 유리한 크리깅 기법을 적용하여 어떤 해상도가 더 현재 대기질을 잘 표현하는지 평가하였다. 우선 서울시의 공간 구역을 크게 4가지 해상도로 구분하였다. Air Korea 웹 서비스에서 서울시 대기질 서비스에 사용하는 5개 공간구역과 25개 서울시 구 공간구역, 구 공간을 4개로 분할한 100개 공간구역, 서울시 동 424개 공간구역을 연구 대상 공간으로 설정하였다.

임의로 미세먼지 농도를 먼저 424개의 공간구역에 할당하여 그림 8의 (A)와 같은 형태로 표시하였다. 그룹화 원칙에 따라 424개 → 100개 → 25개 → 5개의 공간구역으로 그룹화하여 미세먼지 농도를 할당하였다. 미세먼지 농도를 지도 위에 표시해본 결과 공간구역이 작을수록 미세먼지의 농도 표현이 공간별로 구분되어 표시되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 현재 측정소 위치 특성 등과 측정결과 등을 종합하고 거리 및 지리적, 지역적 특성을 고려하여 GIS 기법의 도입을 통한 분석을 실시하고 적정한 모니터링 지점을 제안할 수 있다.

4. 결론

기존 미세먼지 측정망은 하나의 측정소가 너무 넓은 지역을 대표함에 따라 측정 해상도가 낮아 지점별 농도의 정확도의 오차가 크다. 따라서 현재보다 해상도를 높여 미세먼지 측정의 신뢰도를 높일 필요가 있다. 현재 기존 측정망은 도로변 측정소를 제외하고 서울시 행정구별 도시대기 측정소(25개소)가 설치되어 있으나, 고해상도 모니터링을 위해서는 최소한 100개 이상의 측정망을 신규 개설이 필요할 것으로 판단된다.

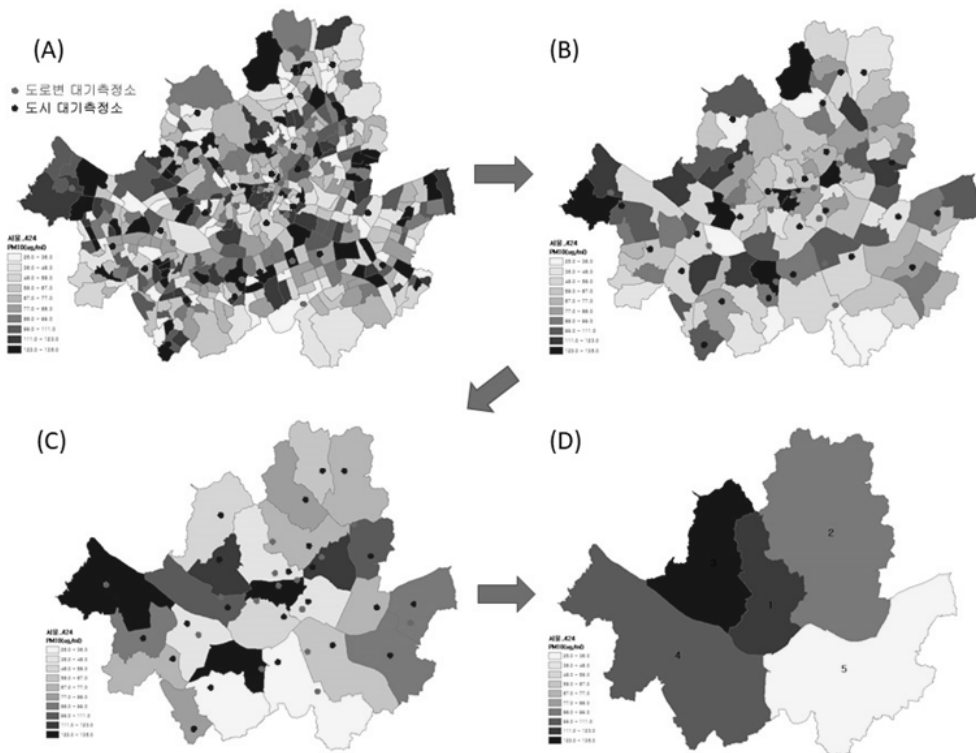


Fig. 8. The allocation of monitoring values in Seoul and the average by area.

고해상도 모니터링 적용시 기존 중량농도법 및 베타선흡수법을 적용하기에는 장치의 비용이 매우 고가이며 일정 규모 이상의 공간이 필요하는 등 해당 방식을 여러 지점에 적용하기에는 여러 가지 문제점이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 실시간 측정이 가능하고 경제적 비용이 기존 방식에 비해 저렴한 광산란방식을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

광산란 측정기의 성능평가를 통해 실제 기존 측정소와 유사한 경향을 나타내는 것으로 확인되었으며 수치 보정을 통해 오차율이 현저하게 저감되는 것으로 확인되었다. 광산란 측정기의 경우 우천시 높은 상대습도로 인한 오차가 발생할 수 있으나 이는 측정 전단에 전처리 시스템을 적용하면 수분의 응결을 방지하여 보다 신뢰도 높은 측정값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 광산란 측정기와 전처리시스템을 적절하게 활용한다면 기존 방식보다 저비용으로 신뢰도 높은 고해상도 미세먼지 모니터링 적용이 가능할 것으로 판단된다. 모니터링 해상도와 관련하여 GIS 공간분석기법으로 분석한 결과 최소한 200개 지역 이상의 모니터링 해상도를 적용해야 서울시의 동별 미세먼지 예보나 관리가 가능할 것으로 판단된다. 고해상도 대기질 측정 데이터와 서울시 대기정보 연계 데이터를 통합한 대기질 통합 정보를 효율적으로 관리하기 위하여 실시간 관리시스템을 위한 서버 구축이 필요하며, 서버의 구성은 통합 대기질 정보의 보관소로 기능하는 DB 서버와 웹 서비스와 스마트폰 앱 서비스의 관문 역할 담당하는 웹 서버, DB 서버와 통신하여 대기질 정보를 조회하여 서비스하는 역할 담당하는 WAS 서버, DB와 Web 서비스를 위해 구축된 프로그램들의 원본과 기 구축 자료를 보관하는 백업 서버로 구성되어야 한다.

이러한 고해상도 미세먼지 모니터링을 통해 미세먼지 관리지역의 세분화 및 효율적인 관리가 가능해지며, 학교 및 유치원 등 실외 활동을 동반하는 건강 취약 계층에 정확한 환경 정보를 전달하여 건강한 생활을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- Branis, M. (2006). The concentration of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmospheric Environment*, 40, 348-356.
- Day, D. E., Malm, W. C., and Kreidenweis, S. M. (2011). Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity, *Journal of the Air & Waste Managements Association*, 50, 710-716.
- Dempsey, J. C., and Polinshuk, P. (1966). *Radioisotopes for aerospace, Part 2*, New York, Plenum Press.
- IARC (International Agency for Research on Cancer), *Carcinogen classification update*, 2013.
- Kang, D. S., Oh, J. E., Lee, S. Y., Shin, H. J., Bong, H. K., and Kim, D. S. (2018a). Development and performance evaluation of a real-time PM monitor based on optical scattering method, *Particle and Aerosol Research*, 14, 107-119.
- Kang, D. S., Oh, J. E., Lee, S. Y., Shin, H. J., Bong, H. K., Choi, J., and Kim, D. S. (2018b). Development of drying systems for accurate measurement of particulate matter by means of optical particle measuring instruments, *Particle and Aerosol Research*, 14, 191-203.
- Kim, D. S., Cho, Y. K., and Yoon, Y. H. (2014). Development of a real-time monitoring device for measuring particulate matter, *Particle and Aerosol Research*, 10, 1-8.
- Kwon, J. T., Minai-Tehrani, A., Hwang, S. K., Kim, J. E., Shin, J. Y., Yu, K. N., Chang, S. H., Kim, D. S., Kwon, Y. T., Choi, I. J., Cheong, Y. H., Kim, J. S., and Cho, M. H. (2012). Acute pulmonary toxicity and body distribution of inhaled metallic silver nanoparticles, *Toxicological Research*, 28, 25-31.
- Park, S. S., Kim, Y. J., Lee, K. W., Chun, K. J., Lee, J. Y., Lim, Y. S., and Han, J. S. (2001). Development of an automatic Beta gauge particulate sampler with filter cassette mechanism, *Aerosol Science and Technology*, 35, 844-851.

Technology Trend Report of the Korea Environmental Industry & Technology Institute (2014). Analysis of the atmospheric environment issue in 2015 and timely technology trend reports (fine particles, asbestos, radon, highly pathogenic viruses), Korea Environmental Industry & Technology Institute.

Wedding, J. B., and Weigand, M. A., (1993). An automatic particle sampler with Beta gauging, *Journal of Air & Waste Management Association*, 43, 475-479.

WHO, Air Quality Guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update, 2005.