

서울시 대기에서의 고농도 미세먼지 사례 시 특성

대기측정관리팀

최용석 · 윤종철 · 이준복 · 김영호 · 이상열 · 윤종섭 · 엄석원 · 채영주

Characteristics of PM10 High Concentration Events in Ambient Air of Seoul

Air quality monitoring team

**Yong-suk Choi, Jong-cheol Yoon, Jun-bok Lee, Young-ho Kim,
Sang-yeal Lee, Joong-seop Yun, Seok-won Eom and Young-zoo Chae**

Abstract

Ambient PM10 in a Seoul is contributed to by the long term movement of particulates and by photochemical reactions of gaseous matter, as well as by regional air pollution sources. Seoul government has initiated various projects for the improvement of air quality since 2000, and has launched special countermeasures, such as the 'Clear Seoul 2010' initiative. As part of improvement plans for the air quality of Seoul, the concentration of PM10 has been reduced to $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2010. However, because Seoul is prone to substantial large-scale-geographical inputs of air pollutants, significant air quality deterioration can occur due to bad weather conditions in addition to increases in regional external air pollution. The purpose of this study is to clarify the regional characteristics of high concentration events of PM10, and to investigate the causes of increasing pollution. In this study, we carried out detailed monitoring of PM10 from 2008 to 2012 and through the analysis of this data we clarified the regional characteristics of high concentration events of PM10. The number of days of PM10 high concentration events ($>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) were 28, 28, 19, 17 and 5, for 2008, 2009, 2010, 2011, and 2012, respectively. It was estimated that the impact of Asian dust on PM10 high concentration events was about 30%, and that impacts from various internal pollution sources in Seoul was only about 18%. It was presumed that the remaining 52% of pollution sources origin from industrial complexes in Southeast China.

Key words : ambient, air, PM10, high

서론

도시 대기 중 미세먼지는 태양광을 산란 혹은 흡수하여, 대기의 열적 평형에 변화를 주거나, 특히 시정장애를 일으키는 가장 중요한 요인으로 알려져 있다. 또한 호흡기를 통해 천식과 같은 호흡기 질병의 원인이 되기도 하며, 폐 기능을 저하시키고, 면역력을 떨어뜨리며 심장기능에도 이상을 초래할 수 있다. 많은 연구자들이 이러한 이유로 미세먼지에 관심을 갖게 되었으며, 미세먼지를 저감시키려는 노력들이 다양한 분야에서 진행되었다.

서울시 대기 중 미세먼지는 국지적 오염원뿐 아니라 입자상물질의 장거리 이동, 가스상 물질의 광화학반응 등에 의한 광역적인 영향을 받고 있다. 서울시는 서울의 대기질을 선진국 수준으로 개선하기 위하여 2000년 이래로 다양한 사업을 추진을 하였으며, 특히 2006년부터 맑은 서울 2010이란 특별대책(1)을 수립, 추진하여 괄목할 만한 추진 실적을 보이고 있다. 경유시내버스와 청소차량을 CNG 차량으로 99% 교체, 도로물청소, 친환경차량 보급, 친환경적 도시 관리, 생활권 녹지 확충 등 다양한 대기오염 저감 정책을 펼쳤으며, 미세먼지 농도는 꾸준히 감소하였다. 2010년 서울의

미세먼지 농도는 전년에 비해 크게 감소하여 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 환경기준 강화 이래 최초로 연간대기환경기준($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 달성하였다. 서울의 미세먼지 감소 원인을 분석한 결과, 조사기간 동안 황사강도의 감소, 기상특성의 변화에 따른 지역 배출원의 영향 감소, 수도권 미세먼지 저감 대책 추진 등이 지속적인 수도권의 미세먼지 감소에 복합적으로 영향을 미친 것으로 보인다. 그러나 서울은 지형적 특수성을 가지고 있고, 대도시 특성상 언제나 많은 대기 오염원이 산재되어 있어, 기상여건 악화 혹은 외부적인 오염원의 강도 증가 등과 같은 상황이 나타나면 서울시의 대기질은 다시 쉽게 악화될 수 있을 것으로 예상된다(1). 서울시 대기 중 미세먼지의 체계적이고, 지속적인 관리를 위해 선 고농도 대기 오염 시 발생원에 대한 합리적인 규명과 함께 향후 오염에 대한 추정과 판단이 필요하다.

서울시 미세먼지의 고농도 사례를 연구, 미세먼지의 특성 등을 파악하여 발생원 및 농도 증가 원인을 규명할 필요가 있다. 이 연구에서 2008년부터 2012년 5년간 미세먼지의 상세모니터링 및 측정자료를 해석하고, 고농도 사례 시 미세먼지의 특성을 파악하고, 발생원을 추정하였다(그림 1).

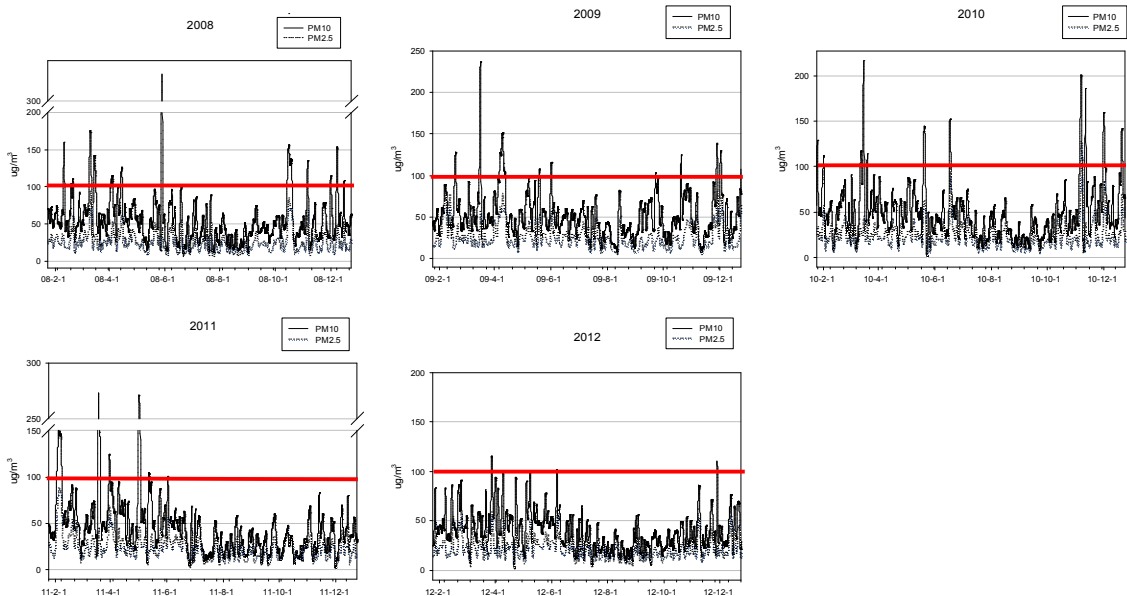


Fig. 1. The daily transients of PM10 and PM2.5 concentration in Seoul ambient air(2008~2012).

연구방법

서울시 대기 중 미세먼지의 고농도 사례를 분석하기 위해 서울시보건환경연구원에서 운영하는 서울시 25개구 측정소 자동 측정망(TMS)의 2008년부터 2012년까지의 미세먼지 데이터를 이용하였다. 또한 서울시 대기와 비교하기 위하여 국가배경농도 측정소 중 하나인 인천 강화군 석모리에 위치하는 교외대기 측정망의 미세먼지 데이터(NAMIS)를 이용하였다(2). 기상자료는 방재기상정보포털서비스 시스템(3)과 기상청(4)으로부터 구하였으며, 역궤적 추적은 NOAA ARL(National Oceanic and Atmospheric Administration, Air Resources Laboratory)의 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하여 계산하였다(5). 고농도 사례 시 서울의 상공 500 m, 1,000 m, 2,000 m 높이에서 발생 당일 18시에 출발하여 72시간의 역궤적을 조사하였다. 미세먼지의 연직분포 및 거동 파악을 위해 광장동 측정소에 있는 라이더(LIDAR: Light Detect and Ranging) 측정 데이터를 사용하였다.

결과 및 고찰

그림 1은 2008년부터 2012년까지 서울시 대기에서의 PM10과 PM2.5의 일일평균 농도변화를 나타낸 그래프이다. 최근 5년간 PM10의 년평균 농도는 2008년 $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 부터 2009년 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2010년 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2011년 $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2012년에는 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약 25% 가량 감소하였다. PM2.5는 각각 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 변화폭이 PM10에 비해 적었다. 그림 2는 월별 PM10 고농도 발생 사례($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)일 수인데, 2월과 3월인 늦겨울과 초봄 그리고 12월인 초겨울에 고농도 발생 사례가 많았다. 기온이 상승하고, 강수량이 많이 집중된 7월과 8월에는 고농도 발생 사례가 하루도 없었다. 미세먼지 고농도 발생 사례는 2008년과 2009년에는 28일, 2010년에는 19일, 2011년에는 17일, 2012년에는 5일로 나타났다.

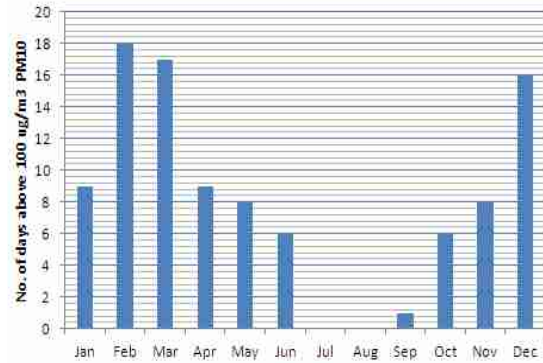


Fig. 2. Monthly variation of PM10 high concentration events($>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) from 2008 to 2012.

1. PM10 고농도 사례와 기상현상

표 1은 최근 5년간의 박무와 연무 발생일 그리고 0.1 mm 이상 강우가 있었던 날을 나타내고 있다. 연간 박무(mist)일수는 2008년에 210일 발생했고, 2009년에는 182일, 2010년에는 179일, 2011년과 2012년에는 각각 164일과 117일로 5년간 54%가 줄었으며, 박무 발생시간은 2008년 1018시간에서 2012년에는 299시간으로 약 70%가 감소했다. 연무(haze)일은 2008년 147일에서 2012년 105일로 약 30%가 감소하였으며, 강우 발생일은 2010년 135일로 다소 높았고, 다른 해에는 약 110일 정도 발생하였다. 박무는 수평 시정(視程)을 1 km 이상으로 감소시키는 아주 작은 물방울이나 습한 흡습성 입자가 대기 중에 부유하는 현상으로, 주로 공기가 정체되어 있을 때 발생되기 때

Table 1. The number of days of mist, haze and precipitation for 5 years

	2008	2009	2010	2011	2012
Mist(day)	210	182	179	164	117
Mist(hour)	1018	884	873	763	299
Haze(day)	147	152	116	127	105
*Rain(day)	110	113	135	108	110

* Days of rain on which are greater than 0.1 mm of precipitation

문에 환경오염물질 농도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 박무 발생일의 감소는 고농도 미세먼지 발생일의 감소로 이어질 수 있다. 연무는 건조한 먼지나 염분 입자가 대기 중에 부유하고 있는 현상으로, 연무를 발생시키는 입자에는 매연·불완전연소물 등의 인공적인 것과 화산재·황사·흙먼지 등의 자연적인 것이 있다. 즉 연무는 미세먼지와 직접 관련이 있으며, 연무가 심한 경우 미세먼지의 농도도 높아진다. 표 1에 나타난 현상만으로도 미세먼지 고농도 발생 사례일수를 예측할 수 있는데, 최근 5년간 박무와 연무 발생일이 감소하였기 때문에 대기 중 미세먼지 또한 감소할 수 있다는 것을 추정할 수 있다. 강우는 대기 중 세정작용으로 미세먼지를 가장 효과적으로 제거할 수 있는 기작인데, 표 1에서 연간 강우일수가 연간 고농도 발생 사례일에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 고농도 발생일에서의 평균 상대습도는 61%로 평년값(30년) 58%, 연구기간 동안의 평균값 60%보다 다소 높았고, 평균 풍속은 2.4 m/s로 평년값 2.5 m/s와 연구기간 동안의 평균값 2.6 m/s 보다 다소 낮았다. 그림 3은 PM10 고농도 사례 발생일에서의 주 풍향을 나타낸 것이다. 주풍은 서풍(27%)과 서북서풍(27%)이었으며, 남서풍(18%)과 서북서풍(12%)이 그 뒤를 이어, PM10이 고농도 발생일에는 서풍계열이 약 84%를 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 서쪽으로부터의 오염원 유입이 많았다는 것을 알 수 있다.

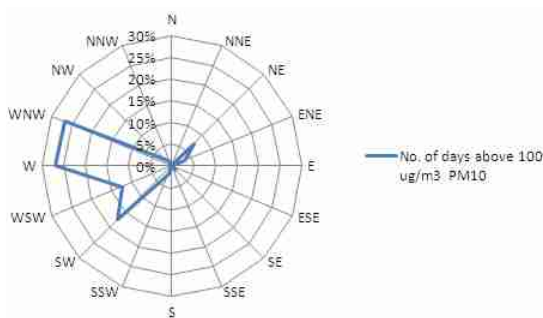


Fig. 3. Wind directions when PM10 high concentration event($>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) happened in ambient air of Seoul.

2. 황사에 의한 미세먼지 고농도 사례

서울시 대기 중 미세먼지의 고농도 사례에 주요한 원인 중 하나는 내몽고 고원, 고비사막, 황토고원 등의 황사 발원지로부터 미세먼지의 장거리 이동에 따른 영향이다. 기상청 황사센터에 의하면, 황사는 주로 850 hPa 고도의 기류를 따라 움직이며, 발원지별 황사 이동 고도는 표 1과 같다. 타클라마칸 사막은 이동고도가 약 4~8 km이며, 중국 북부 지방의 사막으로부터는 3~5 km 이동고도로 황사가 이동하는 것으로 알려져 있다. 또한 황토고원(Loess Plateau)은 2~4 km의 이동고도로 만주지역(Manchuria)으로부터는 1~3 km의 이동고도를 갖는 것으로 알려져 있다.

최근 5년간 황사 발생일수는 2008년부터 2012년까지 각각 11일, 9일, 15일, 9일, 1일로 2012년에 급격히 감소하였다(그림 4). 2012년 황사 일수는 평년(1981~2010년 평균값)의 7.8일보다 매우 적게 나타났는데, 이는 황사 발생이 많은 봄철에 북태평양 고기압이 일찍 세력을 확장해 남풍 계열의 바람이 불면서 황사를 북쪽으로 밀어 올렸기 때문이다(2, 3). 고농도 사례 일수도 2008년 28일 부터 2012년 5일로 급격하게 감소하였으며, 황사 발생일을 제외한 고농도 발생 일수는 2008년부터 2012년까지 각각 21일, 22일, 12일, 11일, 4일로 나타났다(그림 4). 즉 서울 대기의 미세먼지 고농도 발생 시 황사가 미치는 영향은 2012년(1회)을 제외하고 약 7회/년로 조사되었다. 조사기간 동안 PM10 고농도 발생 사례의 황사 영향은 약 30%로 나타났다.

Table 2. migration altitudes of geographic origin of Asian dust

Geographic origin of Asian dust	migration altitudes
Taklamakan Desert	4~8 km
Desert in the North China	3~5 km
Loess Plateau	2~4 km
Manchuria	1~3 km

* Data : Asian Dust center in Korea Meteorological Administration (<http://www.kma.go.kr/dust>)

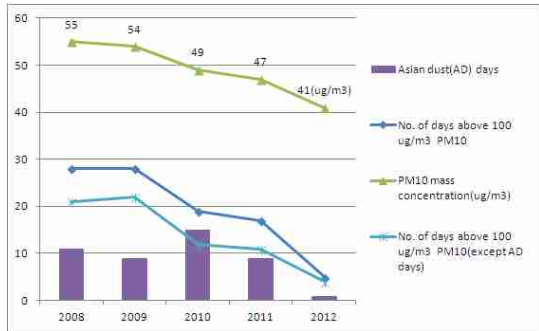


Fig. 4. Number of days on PM10 high concentration events from 2008 to 2012.

그림 5는 황사에 의한 고농도 PM10 발생 사례의 72시간 역궤적 분석을 한 결과이다. (a), (b), (c)의 경우 고비 사막과 내몽골 지역에서 발원한 황사가 북서풍을 타고 장거리를 이동해 미세먼지 오염원이 유입된 사례를 나타내고 있으며, (d), (e), (f)의 경우 중국 중부지방에 위치한 황토고원 등으로부터 황사의 유입이 있었던 것으로 추정된다. 그림 6은 비 황사 시 역궤적 분석 결과인데, 황사 시에 장거리를 빠르게 이동한 것과는 다르게 서해상에서 기류가 머무는 시간이 더 많은 것을 확인할 수 있다. 특히 500 m 이하의 기류는 황사 발생

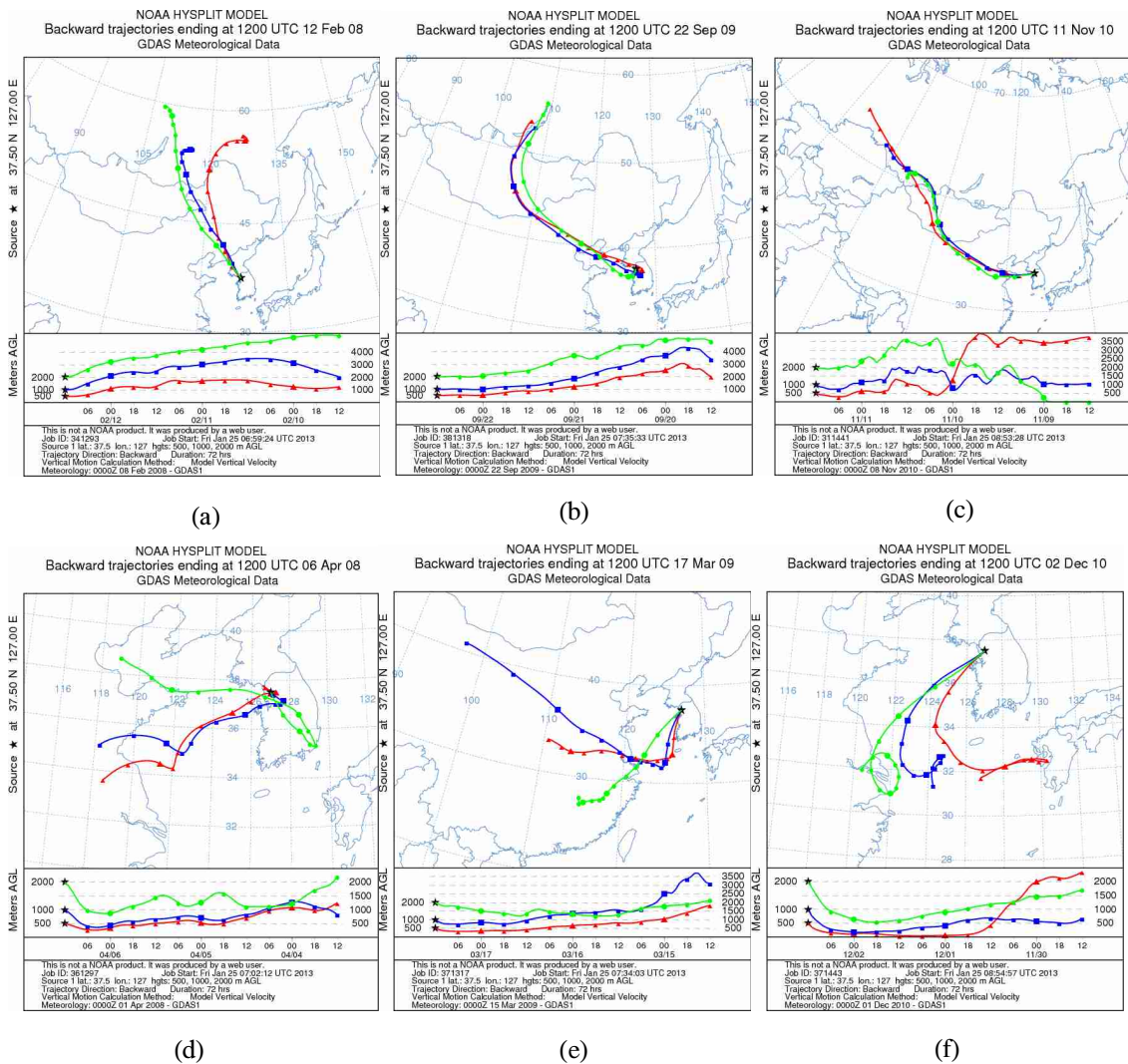


Fig. 5. 72hr backward trajectories ending at Seoul at altitudes of 500m, 1000m and 2000m using NOAA HYSPLIT Model on Asian Dust event.

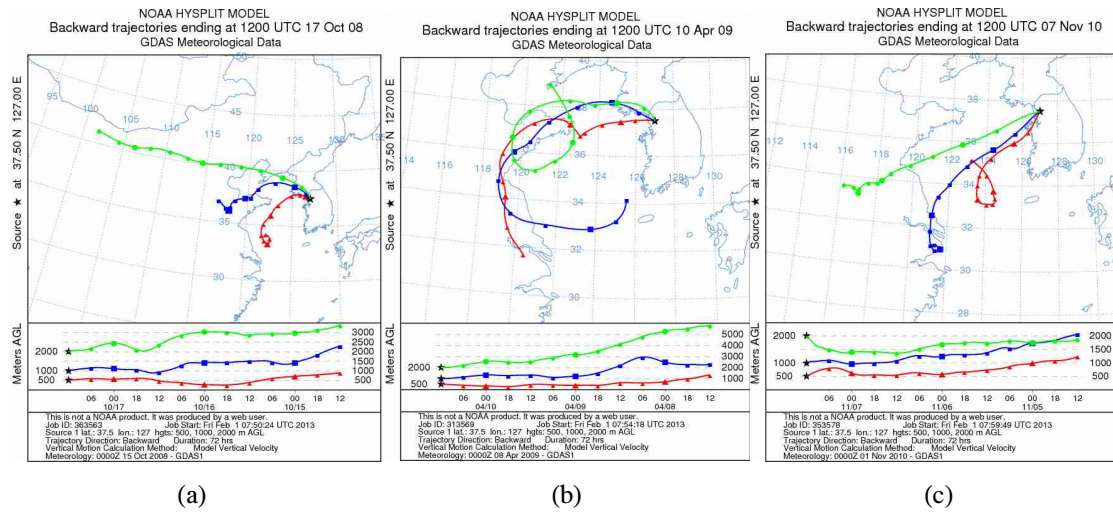


Fig. 6. 72hr backward trajectories ending at Seoul at altitudes of 500m, 1000m and 2000m using NOAA HYSPLIT Model on non-Asian Dust event.

시보다 느리게 이동하는 것으로 보이며, 서울의 미세먼지 농도에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 비 황사 시 서울시에서 관찰되는 고농도 미세먼지 사례의 경우 대부분이 한반도를 중심으로 정체된 고기압 또는 중국으로부터 강한 세력의 고기압이 서서히 동진하는 중관 기상 패턴하에서 발생되며, 고기압 하에서의 강한 하강기류와 느린 이동특성으로 인 해 지면에서 발생한 미세먼지가 원활하게 확산되어 희석되지 못하고 축적되어 고농도가 발생된다(6~7). 또한 중국에서 강한 고기압이 한반도 쪽으로 이동해오는 경우 중국에서 발생한 대기 오염물질이 고기압 전면에 함께 이동되어 서울시 미세먼지 고농도 현상에 기여하는 것으로 추정된다(6, 8).

그림 7은 서울시 PM10 고농도 사례 시 PM10 농도와 인천 강화군 석모리에 위치한 교외 측정망의 PM10 농도를 나타내고 있고, 또한 고농도 사례 시 황사 발생여부를 나타냈다. 교외대기 측정소는 교외지역의 배경 대기질을 파악하기 위하여 운영되고 있는데, 서울로부터 비교적 많이 떨어져 있고, 위에서 언급한 바와 같이 서쪽으로부터의 오염원 유입이 많을 것으로 추정되었기 때문에(그림 3), 도시의 교외지역 배경농도를 나타내는 강화 측정소와 함께 조사하였다. 이를 통해 중국으로부터

발생되는 황사의 연관성과 기타 이유로 인한 PM10 농도의 연동 가능성을 살펴보았다. 화살표는 황사 발생 시 서울시 대기에서의 고농도 사례인데, 이 경우 강화에서의 PM10 농도도 항상 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 황사 발생 시 서울 대기와 강화 대기에서의 PM10 농도는 평균 33%의 편차를 나타냈으며, 비 황사 시 평균 19%의 편차를 나타냈다. 황사 강도가 강할 경우 대기의 이동 속도나 침적속도, 풍향, 풍속, 습도 등 다양한 원인에 의해 강화와 서울에서의 대기 농도가 크게 차이 날 수 있다. 지난 5년간 서울시 대기 중 PM10 고농도 사례 중 환경기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 2배인 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 사례는 총 7회였으며, 주로 황사에 의한 영향인 것으로 나타났다. 비 황사 시 최고 농도는 $193 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 아래에 횡으로 나타낸 선 그래프는 고농도 발생 시 서울과 강화에서의 월 평균 농도를 나타낸 것이다. 서울시 대기 중에서만 PM10이 고농도로 나타났고, 강화에서는 월평균에 유사한 농도를 나타낸 일은 총 17일이었다. 즉 외부로부터의 영향이 아닌 서울시 내부 오염 발생원의 영향으로 미세먼지 고농도를 나타낸 일수는 전체 고농도를 나타낸 일수의 약 18%를 차지하는 것으로 확인되었다. 서울과 강화의 먼지의 이동 시간은 일반적으로 2~3

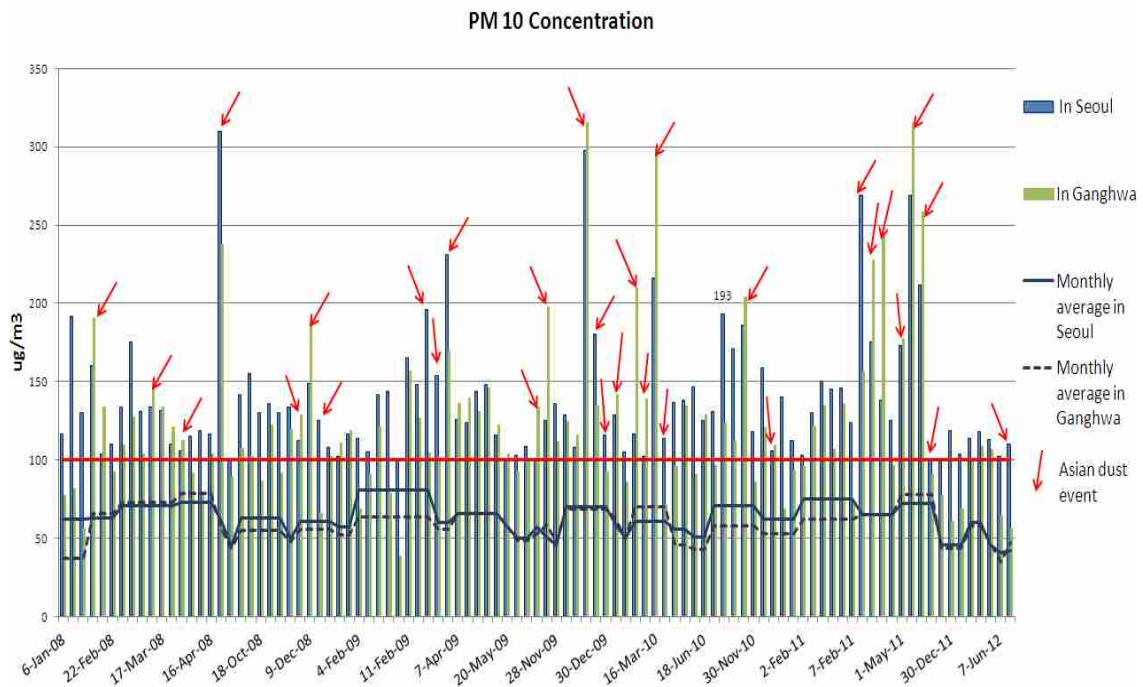


Fig. 7. PM10 high concentration(>100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) events from 2008 to 2012.

시간으로 일 평균값에는 상대적으로 영향이 적다고 할 수 있다. 황사와 내부 오염원의 원인을 제외하면, 약 52%의 기타 요인으로 남는다. 미세먼지 고농도 시 대부분 서풍계열의 바람이 불었으며, 역계적 추적 시 서쪽으로부터의 영향이 확인되었고(그림 6), 황사가 없는 날이었음에도 불구하고, 교외 대기와 서울 대기에서의 농도가 동시에 높았다. 이러한 것을 종합해 볼 때 이 시기에 중국 산업지역으로부터 배출된 오염물질들 혹은 인천 등의 공업지대로부터 오염물질들이 서울 및 수도권 대기질에 영향을 미치는 등과 같은 외부로부터의 요인이 있었을 것으로 판단된다(6).

4. LIDAR를 활용한 대기관측 분석

라이더는 레이저를 발사한 후 대기 중에 존재하는 미세먼지(에어로졸)와 구름 등에 의해 후방산란(back-scattering)되어 되돌아오는 빛의 강도(intensity)를 측정함으로써 미세먼지 및 구름의 연직 분포를 실시간으로 파악할 수 있다(13). 그림 8은 황사 발생 시 구의 측정소 라이더 관측결과로

위의 그림은 후방산란신호이며 아래 그림은 편광도를 나타낸 그림이다. 황사가 발생했던 2008년 12월 8일, 9일 10일 동안의 후방산란신호를 보면 지상에서 약 2.5 km 고도 까지 분포하고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 0.12 내외의 값의 편광도를 나타내고 있다. 2009년 3월 그래프에서도 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 마지막 그래프인 2009년 12월 6일 전후로 편광도가 0.4에 육박하는 매우 높은 농도를 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 9는 비 황사 시 라이더 측정 결과인데, 황사 발생 시 사례와 비교하여 0.03 ~ 0.06 정도로 낮게 나타나 구형의 입자들이 우세하게 존재함을 확인할 수 있다. 2010년 11월 6일과 2011년 2월 5일에 나타난 후방산란신호(위)를 살펴보면 황사 발생 시 광범위한 고도에서의 고농도와는 달리, 대류권 하단 즉 지표부근에서의 농도가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 경우 대부분 고기압 하에서의 강한 하강기류와 느린 이동특성으로 인해 지면에서 발생한 미세먼지가 원활하게 확산되지 못하고, 축적되어 고농도 사례가 발생 한다(6).

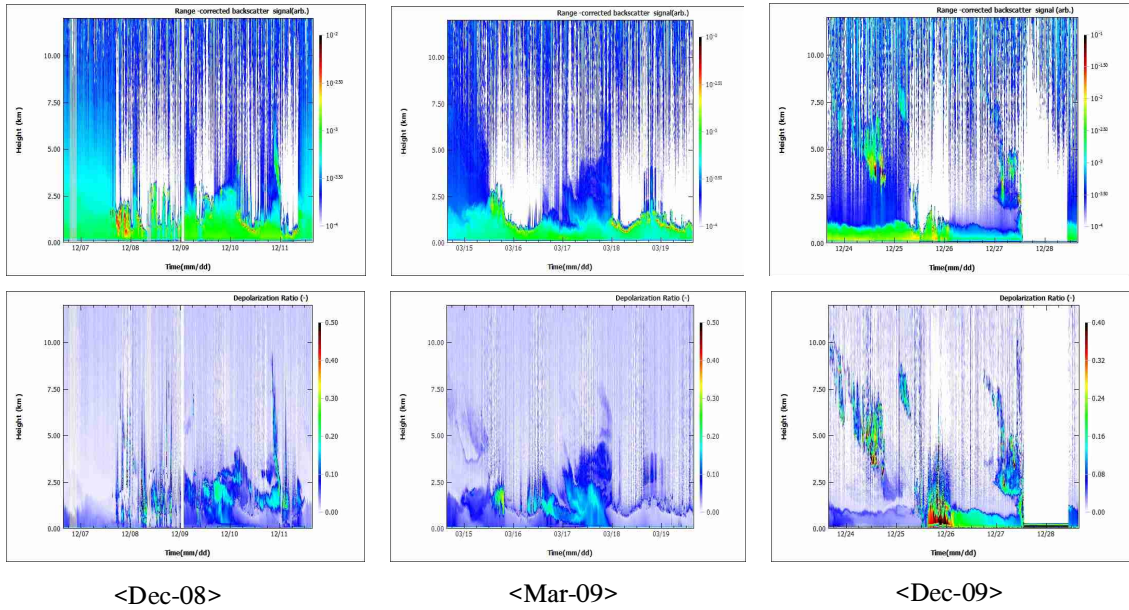


Fig. 8. Lidar observations in Guui monitoring station on Asian dust events.

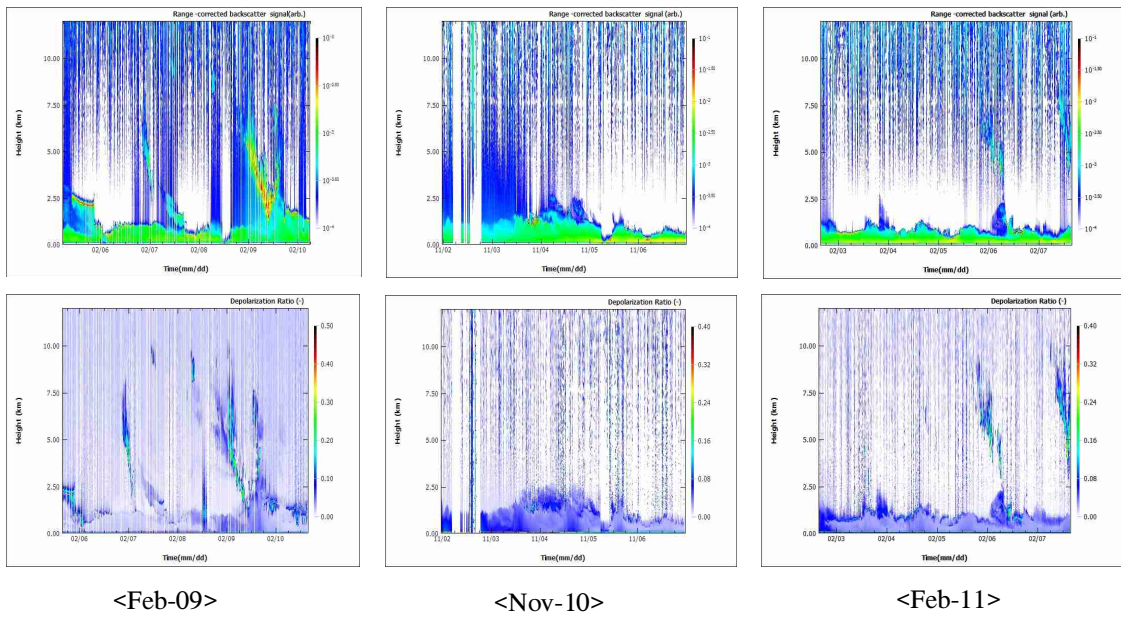


Fig. 9. Lidar observations in Guui monitoring station on non-Asian dust events happened.

결론

서울시의 대기 중 미세먼지의 농도는 국지적인 오염 발생원 같은 내부적인 요인뿐만 아니라 계절·기상 황사와 같은 외부적 요인에 따라 큰 영

향을 받는다. 특히 풍향, 풍속, 강우, 박무현상 등에 따라 미세먼지 농도는 크게 변화될 수 있으며, 중국으로부터의 황사와 산업단지로부터의 유입 등이 서울시 대기에 크게 영향을 줄 수 있다. 2008년~2012년의 5년간 서울시에서 발생한 고농

도 사례를 황사와 비황사 시로 나누어 박무, 풍향, 강우 등 기상상황과 역궤적 추적, 라이다 측정자료 등을 분석하여 고농도 사례의 특성을 평가하였다.

1. 5년간 서울시 대기에서 박무현상은 크게 감소하였으며, 이는 대기오염에 기상현상이 크게 일조했음을 나타내고 있으며, 고농도 사례 시 대부분이 서풍계열이 많아 서쪽으로부터의 영향이 큰 것을 알 수 있었다.
2. 황사는 많은 양의 미세먼지를 중국으로부터 우리나라 전역에 이동시키는 가장 큰 요인 중 하나지만, 서울시 고농도 사례에 미치는 황사의 영향은 약 30%로 평가되어, 초기에 예상했던 것보다는 적게 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
3. 미세먼지 고농도 발생 시 비교군인 교외대기(강화)의 농도는 월평균과 비슷하고, 서울시 대기에서만 고농도를 나타낸 사례가 약 18%로 나타났으며, 이는 외부적인 요인보다는 서울시 내부에서의 오염 발생량이 증가하였거나 발생 오염원이 공기정체 등과 같은 기상여건의 악화가 주원인이었을 것으로 판단된다.
4. 고농도 사례 시 약 52%는 서울시와 교외대기가 함께 높은 농도를 나타내 광역 오염원이 주원인인 것으로 판단되며, 대기오염의 상당 부분이 중국 산업단지로부터의 이동에 의한 영향이 있었을 것으로 추측된다.
5. 향후 서울시 대기질의 평가를 보다 실질적이고, 정확하게 하기 위해서는 내부적으로는 오염 발생량 및 오염 기여도를 평가하고, 중국으로부터의 장거리 이동오염물질의 영향에 대한 정량적 분석 등이 필요할 것으로 보이며, 이를 위해서는 검증된 수치 모델링을 적용해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 서울시 맑은환경본부 : 맑은서울 2010 특별대책, 2008.
2. 국가대기오염정보관리시스템(NAMIS)
<http://www.namis.or.kr/>

3. 기상청 방재기상정보포털시스템
<https://metsky.kma.go.kr/index.html>
4. 기상청 <http://www.kma.go.kr/index.jsp>
5. NOAA <http://ready.arl.noaa.gov/hysplit-bin/trajtype.pl?runtype=archive>
6. 서울특별시, 2차년도 대기 중 미세먼지의 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성조사 연구, 2010.
7. Ogunjobi KO, He Z, Kim KW and Kim YJ : Aerosol optical depth during episodes of Asian dust storms and biomass burning at Kwangju, South Korea, Atmospheric Environment 38:1313~1323, 2004.
8. Arimoto R, Kim YJ, Kim YP, Quinn PK, Bates TS, Anderson TL, Gong S, Uno I, Chin M, Huebert BJ, Clarke AD, Shinzuka Y, Weber RJ, Anderson JR, Guazzotti SA, Sullivan RC, Sodeman DA, Prather KA and Sokolik IN : Characterization of Asian Dust during ACE-Asia, Global and Planetary Change, 52:23~56, 2006.
9. Ryu SY, Kim JE, Zhuanshi H, Kim YJ, and Kang GU : Chemical Composition of Post-Harvest Biomass Burning Aerosols in Gwangju, Korea, PM 2003 Special issue of the Journal of the Air & Waste Management Association, 2004.
10. Kim KW, He Z and Kim YJ : Physicochemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju, Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period, Journal of Geophysical Research, 109: D19S02, 2004.
11. Jung J, Kim YJ, Lee KY, G.-Cayetano M, Batmunkh T, Koo JH and Kim J : Spectral optical properties of long-range transport Asian dust and pollution aerosols over Northeast Asia in 2007 and 2008, Atmospheric Chemistry and

- Physics, 10:5391~5408, 2010.
12. Chun YS, Boo KO, Kim JY, Park SU and Lee MH : Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, Journal of Geophysical research, 106:18,461~18,469, 2001.
 13. Yoon SC, Kim SW, and Kim MH : Ground-Based Mie-Scattering Lidar Measurements of Aerosol Extinction Profiles during ABC-EAREX 2005: Comparisons of Instruments and Inversion Algorithms, Journal of the Meteorological Society of Japan, 86:377~396, 2008.