

춘천시 미세먼지 농도의 장기변동 추세

Long-term Trend of Atmospheric Concentrations of Fine Particles in Chuncheon, Korea

양지혜 · 김성락 · 정진희¹⁾ · 한영지*

강원대학교 자연과학대학 환경과학과

¹⁾한국환경정책·평가연구원 통합환경연구본부 환경관리연구실

(2010년 12월 27일 접수, 2011년 3월 15일 수정, 2011년 5월 30일 채택)

Ji-Hae Yang, Sung-Rak Kim, Jin-Hee Jung¹⁾ and Young-Ji Han*

Department of Environmental Science, College of Natural Science,
Kangwon National University

¹⁾Integrated Environmental Research Group Division of Environmental Management,
Korea Environment Institute

(Received 27 December 2010, revised 15 March 2011, accepted 30 May 2011)

Abstract

Fine particles (PM_{2.5}) were collected and analyzed from December 2005 through December 2009 in Chuncheon, Korea to investigate the long-term trend of PM_{2.5} concentrations. Also PM₁₀ concentrations were collected from Environmental Monitoring System operated by Ministry of Environment. Average concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were 30.5 and 58.2 µg/m³, respectively. Both PM_{2.5} and PM₁₀ were significantly affected by meteorological factors including wind speed, wind direction and precipitation. They generally decreased as wind speed increased (p=0.000), and increased when there was a prevailing westerly wind. Low concentrations of PM_{2.5} were observed during rainy days while high concentrations were shown when fog, mist and/or haze occurred.

Key words : PM_{2.5}, PM₁₀, Wind speed, Wind direction, Precipitation, Fog

1. 서 론

대기 중 미세먼지는 지구에 도달하는 태양빛을 흡수하거나 산란시켜 지구 복사 평형에 중요한 역할을 하고 대기 중 구름형성에 필요한 응축 핵으로 지구 기후변화에도 영향을 미치며, 대기에서 발생하는 여

러 가지 화학적 반응에 주요한 인자이며 시정을 악화시키는 원인이 되기도 한다(Ghim *et al.*, 2005; Schlesinger and Cassee, 2003; Mysliwiec and Kleeman, 2002). 미세먼지의 특성은 1차적으로 입경(diameter)에 의해 좌우되는데, 일반적으로 입경별 질량 분포는 세 개의 모드, 즉 Aitken mode ($d \leq 0.1 \mu\text{m}$), accumulation mode ($0.1 \mu\text{m} < d \leq 1 \mu\text{m}$), 그리고 coarse mode ($d > 1 \mu\text{m}$)로 분포되어 있다. 이러한 에어로졸은 입경별로 주 배출원과 화학적 조성이 달라지며, 인체 및

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)33-250-8579, E-mail : youngji@kangwon.ac.kr

생태 위해성도 달라진다. 이 중 특히 PM_{2.5}는 호흡을 통해 폐의 깊은 곳까지 침투하여 인체에 악영향을 미치게 되며, 농도 증가는 일간 사망률의 증가로까지 이어진다는 연구결과가 보고되어 있다(Kang, 2009; Koenig *et al.*, 2003; Lee, 2003). 이러한 미세먼지의 농도는 기온, 풍속, 강수량, 상대습도 등과 같은 기상요인과 밀접한 관계를 가지고 있다. Park *et al.* (1991)은 기온이 낮아질수록 풍속이 증가하여 환기효과로 인해 대기 중 오염물질의 농도가 낮아진다는 연구를 보고했으며, Na *et al.* (1989)은 오염물질 농도가 풍속의 역수에 비례한다는 보고를 나타낸 바 있다. 또한 박무나 안개 등이 발생한 일기에 따른 TSP 농도 역시 맑은 날보다 2배 이상 높다는 연구결과도 Park *et al.* (2008)에 의해 보고되었다.

미국에서는 미세먼지의 위해성으로 인해 이미 PM_{2.5}에 대한 연평균 기준(15 µg/m³)과 24시간 평균 기준(35 µg/m³)을 마련하여, 대기 중 PM_{2.5}를 감소시키기 위한 정책 마련에 다각도로 접근하고 있다. 반면 우리나라는 대기 중 미세먼지의 농도가 선진국의 2~3배를 상회하는 높은 수준을 보이고 있으며, 아직 PM_{2.5}에 대한 대기환경기준이 마련되지 않은 실정이다. 또한 우리나라의 대기 권역이 지역적 규모에서 중국과 일본 등 동북아시아의 인접 국가를 포함하고 있어서 이들 국가에서 발생하는 미세먼지가 우리나라에 영향을 미치는 독특한 상황이 존재하고 있다. 이러한 이유 때문인지 환경부의 자동측정망으로부터 관측된 대기 중 PM₁₀의 농도는 서울이나 부산과 같은 대도시의 PM₁₀ 수준이 지역 배경농도 측정망에서 측정되는 수준과 크게 다르지 않다. 이러한 사실은 PM₁₀의 주요 부분을 차지하는 PM_{2.5}의 농도 역시 소도시에서도 대도시(또는 산업도시)와 마찬가지로 높게 나타날 수 있음을 시사한다. 그러나 우리나라에서 진행된 대부분의 연구는 대도시 및 산업도시에 국한되어 있으며 소도시에 대한 연구는 제대로 이루어지지 않고 있다.

대기 중 미세먼지 저감을 위한 해결 방향 모색의 근거를 제대로 마련하기 위해서는 미세먼지의 장기간 관측 자료가 필수적이다. 본 연구의 측정 장소인 춘천시는 인구수가 2010년 11월말 기준으로 272,655명인 중소 도시로서, 자동차나 공장 등에 의한 인위적인 미세먼지 배출량이 대도시에 비해 상대적으로 적은 도시이다(춘천시, 2011). 그러나 지형적으로 사면이 봉의산, 용화산, 화학산, 대룡산, 금병산 및 삼악산

등 여러 산줄기로 둘러싸여 분지를 형성하고 1965년부터는 춘천댐, 의암댐, 소양댐 인공호수가 차례대로 건설됨으로써 낮과 밤의 일교차가 심하고 안개가 잘 형성되는 도시이다. 춘천시에서 대기 중 미세먼지의 농도를 측정된 Jung and Han (2008)에 의하면 춘천시의 평균 PM_{2.5} 농도는 39 µg/m³ (2006년 1월~2007년 7월)으로 나타났으며, 춘천의 빈번한 안개 발생과 편서풍에 의한 중국의 영향이 PM_{2.5} 농도를 상승시킨 것으로 판단하고 있다. 이러한 연구 결과는 춘천시의 PM_{2.5} 농도가 풍향과 안개라는 기상학적 요인에 크게 영향을 받는다는 사실을 나타낸다.

따라서 본 연구는, 첫째 춘천시 미세먼지의 농도 경향을 파악하기 위해서 2005년부터 12월부터 2009년까지 4년에 걸쳐 PM_{2.5}의 질량농도를 측정하였으며, 둘째, 이러한 장기간의 측정 자료를 바탕으로 풍향, 풍속, 습도, 강우량, 안개 등의 여러 기상학적 요인들이 춘천시 대기 중 PM_{2.5}의 농도에 어떠한 영향을 주는 지 파악하였다. 또한 환경부 자동측정망에서 측정된 PM₁₀의 농도 경향 역시 더불어 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 시료 채취 및 분석

본 연구에서는 춘천시에 위치한 강원대학교 자연과학대학 2호관 4층 옥상에서 PM_{2.5}를 채취하였다. 시료는 2005년 12월부터 2009년 12월 말까지 4년간 3일 간격, 24시간 단위로 채취하였다. 본 연구에서는 사이클론(URG-2000-30EH)을 사용하여 2.5 µm 이상의 입자를 제거한 후 37 mm 테플론 필터(Pall Life Sciences, Teflo)를 사용하여 PM_{2.5}를 채취하였다. PM_{2.5}를 채취하기 전과 채취한 후에는 테시게이터에서 24시간 동안 항량 건조시켜 수분을 제거하였다.

춘천시의 평균기온, 평균풍속, 강수량, 상대습도 및 PM₁₀자료는 춘천기상대(기상청 소속)에서 직접 측정된 자료들을 주로 이용하였다(<http://www.kma.go.kr/weather/asiandust/graph.jsp?area=2&stnId=101&view=2&tm=2011.03.02>). PM₁₀의 경우 2005년 12월부터 2006년 11월 자료는 국립환경과학원의 신북읍 도시대기측정망의 자료를 이용하였고, 2006년 12월 이후 자료는 춘천기상대에서 측정된 자료를 이용하였다. 춘천기상대는 강원대학교로부터 약 6 km 떨어진

춘천시 우두동에 위치하며, 주변에는 남쪽방향으로 약 300~500 m 거리에 아파트 단지가 조성되어 있다. 그리고 신복읍 도시 대기 측정망은 춘천시 신복읍 산천 2리에 위치하여 강원대학교로부터 약 16 km나 떨어진 먼 곳에 있으며 그 주변으로는 산림이 있고 약 2 km 떨어진 곳에는 용화산 자연휴양림이 위치하고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PM_{2.5}와 PM₁₀의 연도별 및 월별 분포 특성

연구기간인 2005년 12월부터 2009년 12월까지 4년간 채취된 PM_{2.5}의 시료는 총 308개이며 연평균 PM_{2.5} 농도는 2006년(37.0 µg/m³) > 2007년(36.6 µg/m³) > 2008년(34.3 µg/m³) > 2009년(29.6 µg/m³)의 순서로 나타났다. PM₁₀ 농도 역시 2006년(68.6 µg/m³) > 2008년(54.0 µg/m³) > 2007년(53.7 µg/m³) > 2009년(52.0 µg/m³)의 순서로 PM_{2.5}와 비슷한 경향을 보이며, 춘천시 미세먼지의 농도는 감소 추세를 나타내었다(그림 1). 이러한 연도별 감소 경향의 원인 중 한 가지로 황사 발생을 들 수 있는데, 지난 4년간 황사의 발생 수는 2006년 12회, 2007년 13회, 2008년 6회, 2009년 7회로 점점 감소하면서 PM₁₀ 농도의 감소 추세와 유사하였다. 황사로 인한 미세먼지의 고농도 발생은 여러 논문에서도 이미 보고되었다(Jung *et al.*, 2008; Kang *et al.*, 2007; Baek and Jung, 2004). 황사 이벤트 제외한 연도별 미세먼지의 농도를 비교한 결과, PM₁₀의 경우 2006년 61.0 µg/m³, 2007년 47.5 µg/m³,

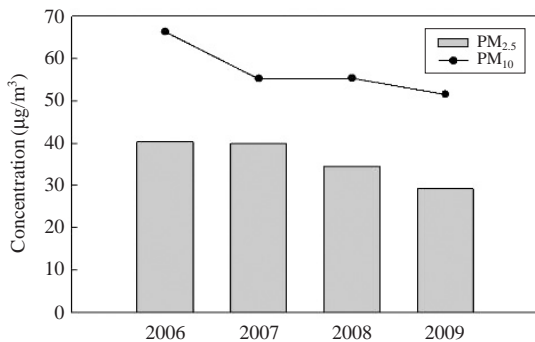


Fig. 1. Annual concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ in Chuncheon.

2008년 49.0 µg/m³, 2009년 52.1 µg/m³로 4년간 약 9 µg/m³으로 감소하였고, PM_{2.5}의 경우 2006년 36.4 µg/m³, 33.8 µg/m³, 29.9 µg/m³, 29.9 µg/m³으로 약 7 µg/m³ 정도 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 통계적인 검정(t-test)에 의하면 황사시와 비황사시에 PM_{2.5} (p-value=0.433) 및 PM₁₀ (p-value=0.079) 농도 모두 평균차가 크지 않은 것으로 분석되었다. 따라서 춘천시 대기 중 미세먼지의 농도 감소 요인 중 하나로 황사 발생 감소를 들 수는 없으나 지난 2002년부터 정부에서 실시해온 지역배출 허용 총량제 및 사업장 총량 관리제, 저공해자동차 보급 및 구매 의무화, 특정 경유자동차 매연기준 강화 사후 관리방안 등의 내용으로 미세먼지의 총량을 줄이기 위해 제정한 수도권 대기질 개선 특별법 시행이 미세먼지 감소의 원인으로 생각된다. 한편 강우일을 제외한 미세입자의 농도 추세를 PM_{2.5}의 경우 2006년(40.3 µg/m³) > 2007년(39.9 µg/m³) > 2008년(34.6 µg/m³) > 2009년(29.2 µg/m³)의 순서로 나타났다. PM₁₀ 농도 역시 2006년(66.3 µg/m³) > 2008년(55.4 µg/m³) > 2007년(55.3 µg/m³) > 2009년(51.6 µg/m³)의 순서로 PM_{2.5}와 비슷한 경향을 보였다.

PM_{2.5}의 계절적 농도 경향을 살펴보면 일반적으로 겨울, 봄, 여름 및 가을 순으로 높은 농도를 보였고, PM₁₀은 봄, 겨울, 여름 및 가을 순으로 농도 변화 경향이 있었다(그림 2). 이처럼 PM_{2.5}와 PM₁₀이 가장 고농도로 관측된 계절은 각각 겨울과 봄으로써 약간 상이한 패턴을 나타냈다. 또한 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율을 살펴보면 황사 발생이 잦은 봄철에는 가장 낮은 PM_{2.5}

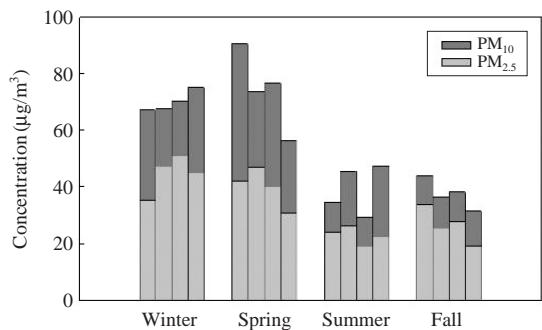


Fig. 2. Average seasonal concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ in Chuncheon. Four bars for each season represent 2006, 2007, 2008 and 2009 from left to right.

의 기여율(%)을 나타냈고 여름철이 되면서 점점 비율(%)이 증가하여 가을, 겨울(%)에 가장 높은 비율을 나타내었다(그림 2). 즉 PM₁₀에서 PM_{2.5}가 차지하는 비율(PM_{2.5}/PM₁₀)은 계절별로 30% 이상 차이나는 현상을 보여주는데, 이는 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도에 영향을 미치는 주요 오염원이 일정부분 동일하지 않다는 것을 나타낸다. PM_{2.5}는 산업, 운송 및 연소 활동과 관련된 인위적인 오염원에서 주로 발생하는 반면 PM₁₀은 바람에 의한 먼지나 자동차, 도로의 비산 먼지 등 자연적인 오염원에서도 다량이 발생된다(Jin *et al.*, 2002). 따라서 사계절 중 화석연료의 사용량이 많고 혼합고도가 낮은 가을, 겨울철에 PM_{2.5} 농도가 가장 높게 측정되었고, PM₁₀은 황사발생이 잦은 봄철에 가장 높은 농도가 나타난 것으로 생각된다. 여름철에는 화석연료의 사용량(예: 에어컨)도 증가하지만 집중적인 호우로 인한 습식 침적과 높은 대기혼합고도로 인해 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도가 모두 감소하는 것으로 나타났다(Jung and Han, 2008). 그러나 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율은 여름철에도 높은 값을 나타내었는데, 이는 PM_{2.5}의 scavenging coefficient가 매우 낮고 여름철에는 광화학 반응으로 인한 PM_{2.5}에 속하는 2차 에어로졸의 생성이 일반적으로 증가하기 때문으로 생각된다(Tecer *et al.*, 2008).

각 연도별로 PM_{2.5}와 PM₁₀ 기준치 이상인 고농도

발생 일수의 추세를 파악한 결과(PM_{2.5}의 경우 미국 환경청에서 제시한 24시간 대기환경기준인 35 µg/m³을 적용하였다), PM_{2.5}의 경우 2006년부터 2009년까지 총 시료 채취일의 44%, 43%, 29%, 34%가 기준치를 각각 초과하였고 PM₁₀의 경우 총 시료 채취일의 19%, 5%, 8%, 9%가 각각 초과하였다. 이러한 고농도 현상은 특히 봄과 겨울철에 다수 발생하였으며, PM_{2.5}의 기준 초과일은 PM₁₀에 비해 모든 계절에서 골고루 나타났다(그림 3). 특히 여름철에는 PM_{2.5}와 PM₁₀의 기준 초과일이 극히 드물었는데, 2007년 여름과 가을(6월부터 11월까지)의 경우 PM₁₀의 기준을 초과하는 일수는 나타나지 않은 반면 PM_{2.5}는 총 10회가 발생하였다(그림 3). 이는 PM₁₀ 농도에 영향을 미치지 않는 오염원의 활동이나 기상 요인이 PM_{2.5}의 농도 증가에 기여했다는 것을 나타낸다.

3.2 기상요인에 따른 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도

3.2.1 상대습도의 영향

PM_{2.5} 농도에 대한 상대습도의 영향을 파악하기 위하여 우선 특이시료인 황사 시료를 제외하고 살펴 보았다. 상대습도 분포에 따라 PM_{2.5} 농도는 RH가 30~60%까지 증가하는 경향을 보이다가 60~80%까지는 감소한 양상을 보였고 80~100%까지는 다시 증가하

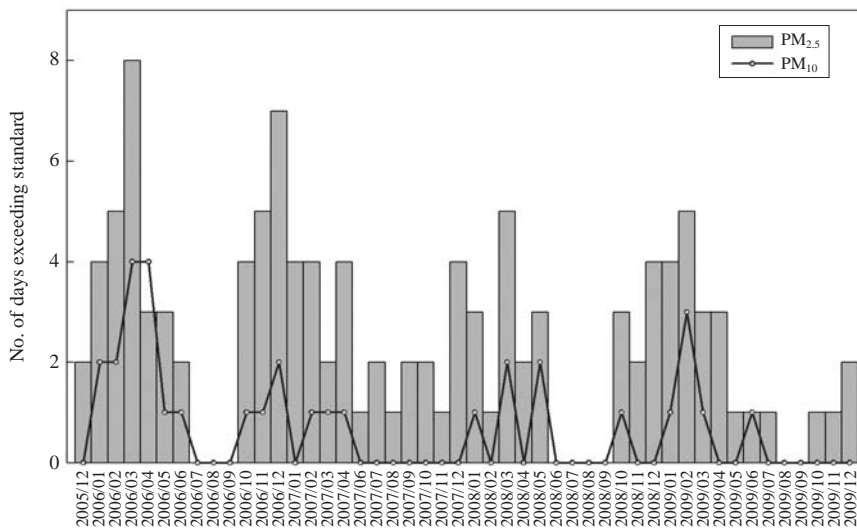


Fig. 3. The number of days having PM_{2.5} and PM₁₀ concentration exceeding daily standard. PM_{2.5} daily standard was used as NAAQS of USA.

는 경향을 나타냈다. 그러나 이러한 경향은 통계분석 결과 상대습도와 PM_{2.5} 농도 사이에는 상관성이 없는 것으로 나타났다(p=0.766). 또한 PM₁₀ 농도와 상대습도의 영향을 파악하기 위해 통계 분석을 한 결과 상관성이 없는 것으로 나타났다(p=0.152).

3.2.2 풍속에 따른 PM_{2.5}

2006~2009년까지 황사기간을 제외한 춘천시의 PM_{2.5} 농도는 풍속이 커질수록 점점 낮은 농도를 보이는 대개 반비례 관계를 보이고 있다(그림 4). 풍속이 0.1~0.5 m/s 일 때 PM_{2.5} 평균농도는 45 µg/m³으로써 미국 EPA PM_{2.5} 일일기준치 35 µg/m³보다 약 1.3 배 높은 농도 값을 보였으며 다른 풍속 구간에 비해 가장 높은 농도로 관측되었다. 풍속이 0.6~1.0 m/s 구간은 35 µg/m³, 1.1~1.5 m/s 구간은 25 µg/m³, 1.6~2.0 m/s 구간은 23 µg/m³으로 관측되어 2.1~2.5 m/s 구간은 20 µg/m³으로 점점 감소하다가 풍속이 2.6~3.0 m/s 일 때는 7.5 µg/m³으로 나타나 풍속이 증가할수록 PM_{2.5}의 농도가 감소하는 관계를 보였다. 비모수 통계분석(Spearman) 결과 풍속과 PM_{2.5}의 농도 사이에는 상관성이 있는 것으로 나타났으며(p<0.001), 풍속이 증가할수록 PM_{2.5} 농도는 감소하는 반비례 관계로 분석되었다. 이는, 풍속이 낮은 날은 대기가 정체되어 수평적 혼합이 줄어들며, 따라서 대기 중 미세먼지의 농도가 대체적으로 높아진다는 결과를 나타낸다. 본 논문의 연구결과와 동일하게 Chae (2009)도 풍속이 증가할수록 PM₁₀의 농도는 감소한다는 동일한 결과를 제시한 바 있다. Chae (2009)는 특히 여름철에 강우에 의해 낮은 풍속으로 인하여 PM₁₀의 낮은 농도가 측정되었다고 보고하였다.

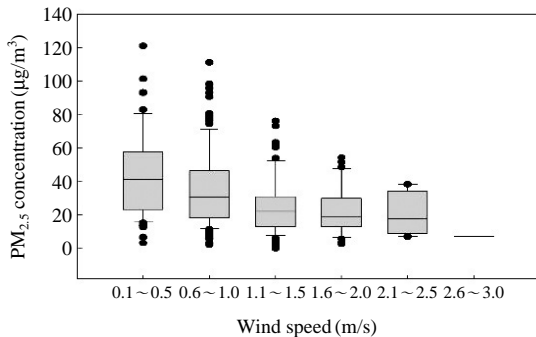


Fig. 4. PM_{2.5} concentration classified by wind speed. Error bar indicates one standard deviation.

3.2.3 풍향에 따른 PM_{2.5} 농도

춘천은 서울에 비하여 오염원의 미세먼지 배출량이 매우 적음에도 불구하고(대기정책지원시스템, CAPSS) 대기 중 미세먼지의 농도는 서울과 유사한 수준을 나타내었다(서울: 39.0±21.4 µg/m³; 허종배 등, 2004). 이러한 결과는 춘천시 미세먼지 상당량이 외부에서 유입되는 것으로 의심할 수 있다. 실제로 Jung and Han (2008)에 의해 춘천시 PM_{2.5}의 고농도가 발생한 시료(상위 10%)와 저농도가 발생한 시료(하위 10%)의 역계적을 계산한 결과, 뚜렷한 차이를 보여주었다. 고농도 시료의 역계적은 중국의 산업지역과 수도권을 통과한 반면, 저농도 시료의 역계적은 주풍향이 동풍, 북풍, 남풍이었다. 춘천시 PM_{2.5} 농도에 미치는 풍향의 영향을 파악하기 위하여, 본 연구에서는 풍향별로 PM_{2.5}의 농도를 그룹화하였다(그림 5). 먼저 풍향의 빈도를 보면, 춘천시는 바람이 0.5 m/s 이하로 부는 날이 22.5%를 차지하였고 북풍이 부는 날이 19.4%로 차지하였다. 각 풍향에 따른 농도 비교 결과로는 바람이 불지 않는 경우(풍속이 0.5 m/s 이하인 경우)가 46.7 µg/m³로 가장 높은 농도를 보였고, 서풍(42.6 µg/m³)과 북서풍(32.5 µg/m³), 북풍(30.6 µg/m³), 남서풍(29.6 µg/m³), 남풍(24.4 µg/m³), 북동풍(17.4 µg/m³), 남동풍(15.6 µg/m³), 동풍(13.9 µg/m³)의 순서로 풍향에 따른 PM_{2.5} 농도를 보였다. 바람이 거의 불지 않는 정은 상태(<0.5 m/s)일 때는 오염물질의 정체 현상으로 인해 대기 중 PM_{2.5} 농도가 가장 높게 관측된 것으로 보인다. 서풍 또는 북서풍을 타고 온 PM_{2.5} 농도가 대체적으로 높은 농도를 보인 까닭은 대륙의 사막이나 대기오염 정도가 심각한 중국으로부터 불어온 장거리 이동 수송에 의한 것이기 때문

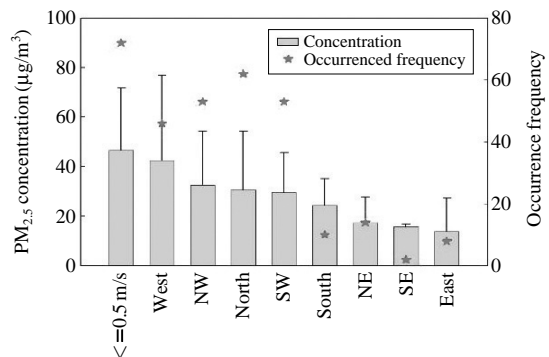


Fig. 5. PM_{2.5} concentration classified by wind direction.

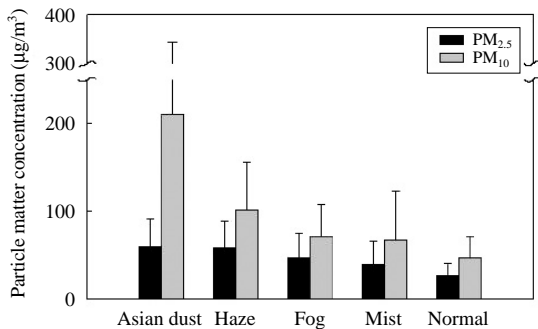


Fig. 6. PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations categorized by weather condition. Error bar indicates one standard deviation.

이다. 그러나 일부는 편서풍이 주를 이룸에도 불구하고 아주 낮은 농도를 보였다. 이러한 사례들의 대부분은 주로 수분에 의한 대기 중 오염물질 제거과정인 습식침적과 낮은 풍속(0.6~1.2 m/s)으로 인해 대기 중에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 특히 2006년 8월 20일은 아주 낮은 PM_{2.5} 농도가 관측 (<1 µg/m³)되었다. 이는 이 시기에 상대적으로 높은 풍속(1.2 m/s)과 5일간 지속된 습식침적이 미세먼지 질량농도에 영향을 미친 것으로 추정된다.

3. 2. 4 안개의 영향

춘천시는 풍속이 낮음과 동시에 소양댐, 춘천댐, 의암댐인 다목적댐이 위치하여 안개 발생이 잦은 지역이다. 안개가 발생하는 날의 미세먼지 농도 특성을 파악하기 위해, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도를 황사(Asian dust), 연무(haze), 안개(fog), 박무(mist), 일반(normal)의 5 그룹으로 나누어 비교하였다(그림 6). 안개, 연무 및 박무의 구분은 기상청의 자료를 따랐으며 구분의 기준은 시정거리와 상대습도인데, 시정거리가 1 km 이하의 경우 안개(fog)로 정의한다. 반면 연무와 박무는 시정거리가 1~10 km로, 연무는 상대습도가 70% 미만일 때, 박무는 상대습도가 80% 이상일 때로 구분한다. 상대습도가 70~80% 사이일 경우 선행기상연구에 의하면 안개나 비와 같은 물현상이 관측되면 박무, 황사 같은 먼지현상이 관측되면 연무로 구분하나 어떠한 현상이 관측되지 않으면 상대습도가 75% 이상시 박무, 75% 미만시 연무로 분류한다(광주지방기상청, 2011). 2006~2009년 동안 채취된 일기 유형에 따른 시료의 개수는 Normal 89개, 황사 13개, 연무 33개, 안개 61개,

그리고 박무 189개로 충분한 시료 개수를 이용하여 분석하였다. 황사가 발생한 경우에 PM_{2.5}(60.8 µg/m³) 및 PM₁₀(210.7 µg/m³)의 농도가 모두 고농도로 나타났고 연무(PM_{2.5}=58.7 µg/m³, PM₁₀=101.2 µg/m³), 안개(PM_{2.5}=47.4 µg/m³, PM₁₀=71.0 µg/m³), 박무(PM_{2.5}=39.7 µg/m³, PM₁₀=67.0 µg/m³), 일반(PM_{2.5}=26.7 µg/m³, PM₁₀=46.7 µg/m³) 순으로 나타났다(그림 6).

PM_{2.5}와 PM₁₀에서 각 일기 유형에 따른 네 가지 그룹(황사, 연무, 안개, 박무)의 시료 농도는 일반 시료(Normal)의 농도와 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다(p<0.05, Tukey HSD). PM₁₀에서는 황사와 다른 네 그룹간의 평균농도 차이가 큰 것으로 나타났으나 박무와 연무 그룹의 시료 농도는 안개 시료의 농도와 평균 차이가 크게 나타나지 않았다. 반면 PM_{2.5}는 황사 시료 농도가 박무와 Normal의 시료들 간에만 차이가 있을 뿐 연무와 안개 시료들과는 평균 농도 차이가 크지 않았으며 연무 시료는 박무 시료와 평균 농도 차이가 크지만 안개 시료와는 농도 차이가 크지 않는 것으로 분석되었다(p>0.05).

황사 발생의 경우 PM_{2.5}의 농도도 일반 시료에 비해 약 2배 이상 높은 값이 관측되었지만 PM₁₀의 경우 일반 시료의 4.5배 높은 농도가 관측됨으로써, PM_{2.5-10}의 농도가 월등히 높아진다는 것을 보여준다. 반면 안개 발생시에는 PM₁₀의 농도는 황사에 비해 크게 낮았으나 상당히 높은 PM_{2.5}의 농도를 나타내었다. PM_{2.5}/PM₁₀의 비율을 계산해보면, 황사가 발생한 날의 경우가 가장 낮은 29%를 기록하였고 안개가 발생한 경우 67%로 가장 높은 비율로 측정되었다. 안개가 발생하는 경우 PM_{2.5} 농도가 높아지는 이유는 가스상 이온이 수분의 존재 하에서 2차 에어로졸을 많이 생성하기 때문으로 생각된다(Jung and Han, 2008). 춘천에 안개나 박무가 발생한 시간은 대부분 새벽 시간이었으며, 2차 에어로졸의 전구물질 중 하나인 HNO₃의 밤 시간 생성 주요 기작은 N₂O₅와 H₂O의 반응이다. 밤에 생성된 HNO₃는 다음 날 낮에 2차 에어로졸을 생성시킬 수 있다. 또한(NH₄)₂SO₄, Na₂SO₄ 등과 같은 이온성 에어로졸이 안개 발생시에는 용해 임계치(deliquescence relative humidity; DRH)를 초과하여 순간적으로 다량의 수분을 흡수하여 에어로졸의 질량을 높일 가능성도 있다. 또한 안개 발생시의 풍속을 분석해 본 결과, 지난 4년간 평균 풍속이 1.1 m/s인 반면에 안개가 발생한 날의 평균 풍속은 0.8 m/s로 대기

가 다소 정체하는 현상이 있었다. 따라서 안개 발생 시의 낮은 풍속도 PM_{2.5} 농도를 높게 하는 요인으로 추론할 수 있다.

3.3 저농도 및 고농도 시료의 특성

저농도와 고농도 시료의 특성을 파악하기 위하여, 본 연구에서는 연구기간 동안 황사를 제외한 시료 296 개 중 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도의 하위 10%와 상위 10%에

대한 시료만을 따로 분류하여 그 특성을 파악하였다. 우선 하위 10%와 상위 10% 시료의 농도는 각각 PM_{2.5}는 9.2 µg/m³, 76.0 µg/m³이고 PM₁₀은 18.4 µg/m³, 115.9 µg/m³으로 나타났으며, 계절적으로는 같은 그룹 내에서도 봄과 겨울의 농도가 여름과 가을에 비해 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 또한 상위 10%를 추려 본 결과(N=29), PM_{2.5}와 PM₁₀에서는 겨울(62.1%, 51.7%)과 봄(17.2%, 24.1%)에 가장 많이 발

Table 1. Summarized PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations during 4 years.

		PM _{2.5}			PM ₁₀	
		N	Arithmetic mean ± S.D.	Geo.mean ± S.D.	Arithmetic mean ± S.D.	Geo.mean ± S.D.
2006	Spring	25	42.2 ± 23.2	34.3 ± 24.1	98.0 ± 93.0	74.6 ± 93.6
	Summer	17	24.7 ± 16.7	17.5 ± 17.7	42.5 ± 29.7	32.5 ± 30.5
	Fall	21	33.8 ± 27.0	24.8 ± 27.8	51.3 ± 36.8	40.1 ± 37.6
	Winter	29	35.4 ± 21.1	28.9 ± 21.8	68.8 ± 32.3	61.2 ± 61.2
2007	Spring	12	47.0 ± 32.3	39.1 ± 31.9	84.7 ± 120.0	55.5 ± 122.2
	Summer	11	26.4 ± 18.1	19.5 ± 18.6	40.5 ± 26.8	32.3 ± 26.8
	Fall	20	25.5 ± 15.6	21.0 ± 15.9	34.7 ± 19.7	29.1 ± 20.0
	Winter	22	43.4 ± 26.7	33.2 ± 27.9	69.4 ± 24.2	65.2 ± 26.0
2008	Spring	22	40.0 ± 26.9	32.5 ± 27.9	76.4 ± 55.3	62.4 ± 55.8
	Summer	22	15.5 ± 9.5	12.6 ± 9.7	30.0 ± 17.5	25.7 ± 17.6
	Fall	22	22.9 ± 20.9	23.0 ± 20.9	40.9 ± 25.5	35.0 ± 25.6
	Winter	14	51.0 ± 23.5	46.9 ± 23.0	67.2 ± 25.1	62.9 ± 44.9
2009	Spring	25	30.9 ± 14.7	28.3 ± 14.6	57.7 ± 39.8	51.1 ± 40.4
	Summer	13	22.4 ± 19.8	15.5 ± 20.2	42.4 ± 31.4	34.6 ± 31.2
	Fall	9	19.2 ± 12.0	16.5 ± 11.7	30.8 ± 16.6	27.1 ± 16.1
	Winter	24	42.4 ± 23.1	35.8 ± 23.6	79.4 ± 54.4	67.1 ± 54.6
Total		308	33.8 ± 23.1	25.2 ± 15.0	59.3 ± 51.1	44.4 ± 47.8

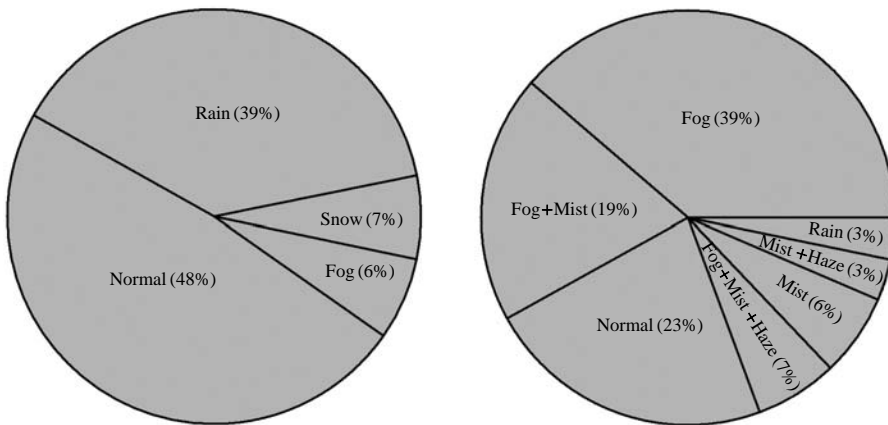


Fig. 7. Contribution of each weather condition to low PM_{2.5} samples (bottom 10%: left) and high PM_{2.5} samples (top 10%: right).

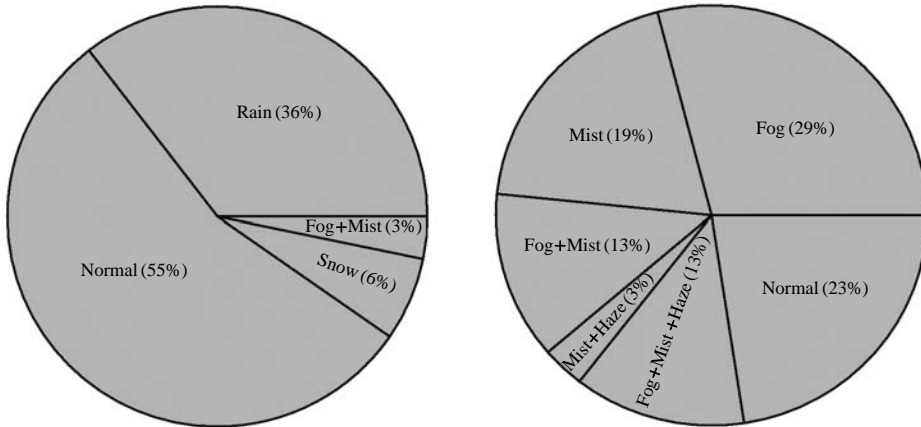


Fig 8. Contribution of each weather condition to low PM₁₀ samples (bottom 10%: left) and high PM₁₀ samples (top 10%: right).

Table 2. Seasonal contribution (%) to the lowest 10% and the highest 10% of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations.

	PM _{2.5}		PM ₁₀	
	Lowest 10%	Highest 10%	Lowest 10%	Highest 10%
Spring	6.9	17.2	3.5	24.1
Summer	62.1	6.9	48.3	10.3
Fall	24.1	13.8	44.8	13.8
Winter	6.9	62.1	12.1	51.7

생하였고, 하위 10%를 추려 본 결과 여름(62.1%, 48.3%)과 가을(24.1%, 44.8%)에 가장 많이 발생하였다(표 2).

또한 저농도와 고농도 시료에 대한 기상 요인의 특징을 살펴보기 위해 눈(snow), 비(rain), 안개(fog), 박무(mist), 연무(haze) 그리고 일반(normal)으로 분류하여 그 발생 빈도수를 살펴보았다. 저농도에는 비와 눈의 발생 빈도가 높았으며, 고농도에는 안개, 박무 및 연무가 영향을 주는 것으로 나타났다(그림 7과 8). PM_{2.5}와 PM₁₀의 경우 모두 공통으로 저농도에서는 일반(normal)인 경우가 가장 많이 발생하였고, 고농도에서는 안개가 낀 날이 각각 39.0% 및 37.0%로 가장 많이 발생하였다. 또한 저농도 그룹 내에서는 눈(8.5µg/m³)과 비(14.9µg/m³)가 내렸을 때 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도가 가장 낮게 측정되었으며, 고농도에서는 안개, 박무 및 연무가 동시에 발생된 날이 116.2µg/m³(PM_{2.5})와 150.4µg/m³(PM₁₀)으로 가장 높게 측정되었다(표 3). 이는 앞에서 언급하였듯이, 안개의 발생으로 인해 2차

Table 3. Concentrations of high PM_{2.5} and PM₁₀ (top 10%) and low PM_{2.5} and PM₁₀ (bottom 10%) for each weather condition.

	Lower 10%		Higher 10%	
	Concentration	Weather	Concentration	Weather
PM _{2.5}	8.5	snow	116.2	fog+mist+haze
	8.5	fog	87.3	fog+mist
	8.9	rain	79.6	mist
	9.5	normal	76.3	mist+haze
			75.1	normal
PM ₁₀	14.9	rain	150.4	fog+mist+haze
	18.4	normal	133.9	mist+haze
	26.5	snow	120.2	mist
	31.9	fog+mist	111.6	normal
			109.8	fog+mist
		102.2	fog	

에어로졸의 생성반응을 증가시키기 때문으로 생각된다. 그러나 안개가 발생할 때에는 종종 대기가 정체되므로 대기의 정체에 의한 오염물질의 농축 현상이 나타날 수 있기 때문에, 본 연구에서는 안개(fog)와 일반(normal) 조건일 때 발생한 풍속과 풍향을 분석하였다. PM_{2.5}의 상위 10%에 해당하는 시료 중 일반의 경우에는 풍속이 0.9 m/s이었으며, 안개가 발생한 날의 풍속은 0.8 m/s로 큰 차이가 나타나지 않았다.

4. 결 론

연구기간 동안 채취된 춘천시 PM_{2.5}(2006년: 37.0

$\mu\text{g}/\text{m}^3 > 2007\text{년}: 36.6 \mu\text{g}/\text{m}^3 > 2008\text{년}: 34.3 \mu\text{g}/\text{m}^3 > 2009\text{년}: 29.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 환경부 자동측정망 자료인 PM_{10} (2006년: $68.6 \mu\text{g}/\text{m}^3 > 2008\text{년}: 54.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 > 2007\text{년}: 53.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 > 2009\text{년}: 52.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 농도는 모두 감소하는 추세를 보였다. $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 모두 봄과 겨울에 높은 농도를 나타낸 반면, 여름과 가을에 낮은 농도를 나타내었다.

$\text{PM}_{2.5}$ 농도는 풍속이 증가할수록 농도가 감소하는 반비례 관계를 보였고($p < 0.001$, Spearman), 서풍이 발생한 경우에 고농도($42.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 관측되었다. 또한 황사, 연무, 안개, 박무의 4개 일기 유형 그룹으로 구분하여 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 농도를 살펴보았는데, 황사가 나타났을 때 가장 높은 농도를 보였으며, 연무, 안개, 박무의 순으로 나타났다. 황사, 연무, 안개, 박무가 발생하였을 때의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 농도는 일반 시료(normal case)의 농도에 비해 통계적으로 유의하게 높았다($p < 0.05$). 채취 시료의 상위 10%인 고농도 시료의 경우 안개, 박무, 연무가 동시에 발생된 날이 가장 높은 농도를 나타낸 반면, 눈이나 비가 내린 날에는 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 농도가 가장 낮게 측정되었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-331-D00278)이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 광주지방기상청 (2011) 연무? 박무? 안개?!!! 도대체 무슨 차이야?, http://blog.naver.com/kj_nalssi/20123700977.
- 박기형, 이병규, 정수근, 함유식 (2008) 박무현상시와 맑은 날의 대기 중 중금속 농도 특성 비교, 한국대기환경학회 논문집.
- 춘천시 (2011) 춘천시소개, www.chuncheon.go.kr.
- 허중배, 김지현, 이용미, 서용석, 이승목, 정장표 (2004) 서울시 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 와 그 이온성분의 분포 특성, 한국대기환경학회 2004년 춘계 학술대회 논문집.
- Baek, K.W. and J.D. Chung (2004) Study on the Yellow Sandy Dust phenomena in Korean Peninsula and chemical compositions in fine particles at background site of Korea, Korean J. Sanitation, 19(4), 9-18.
- Chae, H.J. (2009) Effect on the PM_{10} concentration by wind velocity and wind direction, Journal of Environmental and Sanitary Engineering, 24(3), 37-54.
- Chung, J.D., S.M. Hwang, and H.S. Choi (2008) A study on the characterization of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} concentration at Asian and non-Asian Dust in Asan Area, Journal of KSEE, 30(11), 1111-1115.
- Ghim, Y.S., K.C. Moon, S. Lee, and Y.P. Kim (2005) Visibility trends in Korea during past two decades, Journal of Air Waste Manage. Assoc., 55(1), 73-82.
- Jin, Y.H., H.J. Koo, B.M. Kim, and S.U. Park (2002) Variations of the PM_{10} concentrations observed in eleven cities in South Korea between 1995 and 2000, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 19(2), 231-245.
- Jung, J.H. and Y.J. Han (2008) Study on characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and its ionic constituents in Chuncheon, Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24(6), 682-692.
- Kang, G.U. (2009) Concentration characteristics and health effect assessment of atmospheric particulate matters during asian dust storm episodes, Korean Journal of Environmental Health, 35(1), 21-35.
- Kang, G.U., N.S. Kim, K.S. Kim, M.K. Kim, and H.J. Lee (2007) Concentration characteristics of atmospheric $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , and TSP during the Asian dust storm in Iksan area, Korea Journal of Environmental Health, 33(5), 408-421.
- Koenig, J.Q., K. Jansen, T.F. Mar, T. Lumley, J. Kaufman, C.A. Trenga, J. Sullivan, L.J.S. Liu, G.G. Shapiro, and T.V. Larson (2003) Measurement of offline exhaled nitric oxide in a study of community exposure to air pollution, Environmental Health Perspectives, 111, 1625-1629.
- Lee, J.T. (2003) Dust on health effects of domestic dynamics case, Society of Environmental Toxicology Conference, 129-142.
- Mysliwiec, M.J. and M.J. Kleeman (2002) Source apportionment of secondary airborne particulate matter in a polluted atmosphere, Environmental Science & Technology, 36(24), 5376-5384.
- Na, J.G. (1989) The variation of SO_2 concentration according to wind speed in urban area, Journal of the Korea Air Pollution Research Association, 5(2), 97-105.
- Park, I.S., D.G. Rhee, and I.G. Kang (1991) The meteorological factors governing SO_2 concentrations during the Wintertime in Seoul Area, J. KAPRA, 7(2), 96-104.
- Schlesinger, R.B. and F. Cassee (2003) Atmospheric secondary

inorganic particulate matter: the toxicological perspective as a basis for health effects risk assessment, *Inhalation Toxicology*, 15(3), 197-235.
Tecer, L.H., P. Suren, O. Alagha, F. Karaca, and G. Tuncel

(2008) Effect of meteorological parameters on fine and coarse particulate matter mass concentration in a coal-mining area in Zonguldak, Turkey, *Journal of Air & Waste Manage. Assoc.*, 58(4), 543-552.