

강원도 춘천과 영월에서 측정한 미세먼지 농도 특성 및 고농도 원인 분석

Characteristics of Fine Particles Measured in Two Different Functional Areas and Identification of Factors Enhancing Their Concentrations

조성환 · 김현웅 · 한영지* · 김우진¹⁾

강원대학교 자연과학대학 환경학과, ¹⁾강원대학교 병원 환경보건센터
(2016년 1월 5일 접수, 2016년 1월 21일 수정, 2016년 1월 26일 채택)

Sung-Hwan Cho, Hyun-Woong Kim, Young-Ji Han* and Woo-Jin Kim¹⁾

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

¹⁾*Environmental Health Center, Kangwon National University Hospital,
Kangwon National University School of Medicine*

(Received 5 January 2016, revised 21 January 2016, accepted 26 January 2016)

Abstract

In this study, the characteristics of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ concentrations were identified in two different functional areas including Chuncheon and Youngwol, Korea. Even though the anthropogenic emission rates of $PM_{2.5}$ and PM_{10} are approximately four times higher in Youngwol than in Chuncheon their atmospheric concentrations were statistically higher in Chuncheon. In Chuncheon, both $PM_{2.5}$ concentrations and the ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ increased as relative humidity (RH) increased possibly because the inorganic and/or organic secondary aerosols were actively formed at high RH. This result was also supported by that $PM_{2.5}$ concentration was enhanced under the fog and mist conditions in Chuncheon. On the other hand, both $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ concentrations clearly increased with the southerly winds blown from the cement production facility in Youngwol. In addition, high $PM_{2.5-10}$ concentrations were observed with high wind speed, low relative humidity, and high NO_2 concentrations in Youngwol, suggesting that $PM_{2.5-10}$ was generated through the physical process including crushing and packing procedures followed by resuspension from cement and lime factory.

Key words : $PM_{2.5}$, PM_{10} , Relative humidity, Wind speed, Cement production, Secondary aerosol

*Corresponding author.

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

1. 서 론

대기 중 미세먼지는 인간 건강에 악영향을 미칠 뿐 아니라 가시도 저하, 구름 형성, 기후변화 등에 중요한 영향을 미친다. 미세먼지는 직경이 $10\ \mu\text{m}$ 이하인 PM_{10} 과 직경이 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하인 $\text{PM}_{2.5}$ 로 분류된다. 직경이 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 인 $\text{PM}_{2.5-10}$ 은 주로 토양입자나 해염입자 등 자연적 배출원 또는 기계적인 마모 및 파쇄에서 배출되는 반면, $\text{PM}_{2.5}$ 는 자동차, 공장, 화력발전소, 소각 등 연료 연소에서 직접 배출되는 1차 입자(primary aerosol)와 대기 중 화학반응에 의해 형성되는 2차 입자(secondary aerosol)로 구성된다(Aldabe *et al.*, 2011; Pandolfi *et al.*, 2011; Myles *et al.*, 2010, 2009). $\text{PM}_{2.5-10}$ 은 대기 중 체류시간이 $\text{PM}_{2.5}$ 에 비해 짧고 호흡기 비강이나 기도 등에서 걸러지기 때문에 인체에 대한 피해는 상대적으로 적은 반면, $\text{PM}_{2.5}$ 는 허파파리 등 호흡기의 가장 깊은 곳까지 침투하고 혈관으로 이동하기 때문에 대표적인 호흡기질환 및 심혈관계 질환 야기 오염물질이다. 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도가 호흡기계 및 심혈관계 질환의 유병률 및 사망률과 뚜렷한 상관관계가 있다는 사실은 많은 연구에서 밝혀진 바 있으며(Song *et al.*, 2016), 최근에는 WHO에서 $\text{PM}_{2.5}$ 를 Group 1 발암물질로 규정하였다. 우리나라는 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대해서 대기환경기준이 설정되어 있으며, 연평균은 각각 50 과 $25\ \mu\text{g m}^{-3}$, 일평균은 각각 100 과 $50\ \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 설정되어 있다. 이 기준은 미국의 $\text{PM}_{2.5}$ 기준(연평균 $12\ \mu\text{g m}^{-3}$ 및 $15\ \mu\text{g m}^{-3}$ *, 일평균 $35\ \mu\text{g m}^{-3}$)이나 WHO의 기준(PM_{10} 은 연평균 및 일평균이 각각 $20\ \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $50\ \mu\text{g m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 는 연평균 및 일평균이 각각 $10\ \mu\text{g m}^{-3}$ 및 $25\ \mu\text{g m}^{-3}$)에 비해 다소 높은 편이다.

2012년 전국 대기오염 배출량을 살펴보면 강원도의 연간 PM_{10} 배출량이 3,870톤(비산먼지 및 생물성 연소 제외), $\text{PM}_{2.5}$ 배출량이 2,295톤으로, 2011년에 비해 빈민수용무연탄의 감소로 배출량이 급격히 감소하였다. 강원도는 비금속광물제품 제조업(시멘트 및 석회 생산)이 가장 큰 미세먼지의 배출원이며 주요 시군구 중 영월군이 가장 높은 배출량(PM_{10} : 958톤, $\text{PM}_{2.5}$: 542톤)을 보이고 대규모 배출시설이 존재하지 않는 춘천

시는 그보다 훨씬 낮은 배출량(PM_{10} : 243톤, $\text{PM}_{2.5}$: 154톤)을 나타낸다. 그러나 대기오염자동측정망의 일평균 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도를 살펴보면 미세먼지 배출량이 적은 춘천 지역의 농도가 서울과 수도권의 농도와 유사하거나 더 높게 나타나는 경우도 많다. 강원도는 상당히 높은 미세먼지 배출량을 지님에도 불구하고 PM_{10} 의 대기오염측정망의 수는 7개(춘천 2지점, 원주 2지점, 강릉, 동해, 삼척 각각 1지점), $\text{PM}_{2.5}$ 의 대기오염측정망의 수는 4개(춘천 1지점, 원주 1지점, 강릉 1지점)에 지나지 않으며, 강원도 대기가 청정하다는 인식으로 인해 대기오염에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 환경부는 2015년부터 10년 동안 서울을 비롯한 수도권 지역의 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 각각 $30\ \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $20\ \mu\text{g m}^{-3}$ 로 낮추기 위해 대규모 예산을 투입하여 각종 정책을 수행하기로 하였으나, 정작 미세먼지 배출량과 대기 중 농도가 높은 강원도에 대해서는 별다른 정책이 보이지 않는다.

본 연구는 특성이 뚜렷이 다른 두 지역, 춘천과 영월을 대상으로 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 특성을 살펴보고 고농도 현상을 야기하는 원인을 파악하고자 시작되었다. 춘천은 분지형태의 도시로 인위적 배출원에 의한 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 의 배출량이 매우 적으며 소양호, 의암호, 춘천호 등 많은 호수로 둘러싸여 빈번한 안개가 발생한다는 특징이 있다. 기존의 연구에서는 안개 발생은 춘천시 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도를 증가시키는 역할을 한다는 결과가 보고되었다(Jung and Han, 2008). 또한 춘천은 수도권과 근접한 거리에 위치하여 편서풍이 불 때 수도권 및 중국에서 배출되는 오염물질의 중·장거리 이동에 의해 영향을 받을 수 있다. 뿐만 아니라 2009년 7월 15일에 서울춘천고속도로가 개통되면서 교통량이 크게 증가하여 춘천의 대기질에 영향을 끼쳤을 거라 판단된다. 반면 영월은 중첩된 산간 지역으로 시멘트 공장인 쌍용양회와 현대시멘트가 위치해 있으며 석회석 노천광산도 다수 분포하여 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 의 지역 배출량이 매우 높은 지역이다. 이 지역은 시멘트 공장으로 인해 민원이 끊임없이 발생하였으며 국립환경과학원에서는 영월 시멘트 공장 주변지역 주민의 건강영향조사를 지속적으로 수행하고 있다. 현재 영월군에는 환경부의 자동측정망은 존재하지 않으나 시멘트 업체

* 민감군 건강을 위한 primary standard는 $12\ \mu\text{g m}^{-3}$ 이고 공공보건을 위한 secondary standard는 $15\ \mu\text{g m}^{-3}$ 이다.

와 지자체가 함께 쌍용리와 신천리에 대기측정소를 각각 설치하여 PM_{10} 을 측정 중이다. 본 연구의 목적은 춘천과 영월의 $PM_{2.5}$, PM_{10} , $PM_{2.5-10}$ 농도의 경향성을 살펴보고, 기상자료를 바탕으로 두 지역의 미세먼지 농도를 증가시키는 요인의 지역적 특이성을 파악하는 것이다. 두 지역의 미세먼지 농도에 대한 특이성이 파악되면 미세먼지 저감 대책 수립에 중요한 기여를 할 수 있을 것이라 판단된다.

2. 연구 방법

2.1 시료 채취

본 연구에서는 2012년 4월부터 2014년 2월까지 춘천과 영월 두 지역에서 $PM_{2.5}$ 를 측정하였다. 춘천의 $PM_{2.5}$ 측정 사이트는 4층 건물인 강원대학교 자연과학대학 2호관 옥상(북위 $37^{\circ}52'$, 동경 $127^{\circ}44'$)이며 PM_{10} 은 석사동 자동측정망측정소(북위 $37^{\circ}51'$, 동경 $127^{\circ}45'$)의 자료를 이용하였다. 석사동 자동측정소는 $PM_{2.5}$ 측정 사이트에서 남동쪽으로 1.9 km에 위치해 있으며, 이 측정소에서 수집한 기상자료 역시 본 연구에서 사용하였다. 영월의 $PM_{2.5}$ 측정 사이트는 영월군 한반도면 신천리에 위치한 한반도 면사무소 옥상(북위 $37^{\circ}14'$, 동경 $128^{\circ}19'$)으로, 남서쪽으로 약 600 m 떨어진 곳에 현대시멘트 공장이 있으며 역시 남서쪽으로 약 4.2 km 떨어진 곳에 아세아시멘트 체천 공장이 위치해 있다. 뿐만 아니라 남쪽방향으로 약 5.2 km 떨어진 곳에도 쌍용양회 영월 공장이 위치해 있어, 남풍이 불 때 시멘트 공장의 영향이 나타날 것으로 예측된다. PM_{10} 농도는 시멘트업체와 지자체가 자체적으로 설치한 대기측정소($PM_{2.5}$ 측정장소에서 동쪽으로 400 m 떨어진 지점)의 자료를 사용하였으며 기상자료 역시 동일한 장소에서 측정되었다.

$PM_{2.5}$ 시료는 일반적으로 3일에 한 번씩 24시간 동안 채취를 하였으며 구체적인 시료 채취와 분석은 미국 환경청(US Environmental Protection Agency; US EPA)의 대기 중 미세입자 측정 방법(US EPA, 1999)을 따랐다. 춘천의 경우는 사이클론(URG Corporation)과 필터 팩(URG Corporation)을 사용하여 테플론 필터에 채취하였으며 펌프의 유량은 16.7 LPM, 중량측정은 검출한계 10^{-5} g인 화학저울로 정량하였다. 영월의 경우

는 초미세먼지 연속채취기(PMS-103, APM Engineering)를 이용하여 테플론 필터에 채취하였으며 춘천과 마찬가지로 유량은 16.7 LPM이 이용되었다. 필터의 시료 채취 전후 중량 측정은 검출한계 10^{-5} g인 화학저울을 사용하였다. 시료 채취 및 분석에 필요한 모든 도구는 Alconox와 초순수로 세척한 후 이용하였으며, $PM_{2.5}$ 의 중량농도에 대한 보정은 비교 필터를 같이 보관하며 무게 측정 시 매 시료마다 실시하였다.

기타 대기오염물질의 농도는 강원도 대기환경정보 시스템에 기록된 춘천시 석사동 자동측정망과 영월군 대기측정소를 통하여 수집하였다. 기상자료의 경우에는 춘천과 영월 모두 PM_{10} 측정 장소에서 수집하였으나, 춘천시 안개 자료의 경우에는 기상청의 국내기후자료를 통하여 춘천 기상대에서 측정된 날씨자료를 토대로 자료를 정리하였다.

2.2 Conditional Probability Function (CPF)

CPF 분석은 고농도가 나타나는 풍향을 파악하기 위해 사용되는 조건부 확률로 아래와 같은 수식으로 계산된다.

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (1)$$

여기서, $m_{\Delta\theta}$ 는 $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 바람의 빈도수 중 $PM_{2.5}$ 및 $PM_{2.5-10}$ 농도가 상위 25%일 때의 바람 빈도수를 사용하였으며, $n_{\Delta\theta}$ 는 $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 바람의 총 빈도수이다.

2.3 역궤적(Back-trajectory)

특정 기간 동안 유입되는 공기의 흐름을 파악하기 위하여 미국해양대기국(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory (HYSPPLIT 4.7) 모델을 이용하여 역궤적을 계산하였다. 모델 자료는 3차원 기상 자료인 Global Data Assimilation System (GDAS)을 이용하여 사용해주었으며 모사시간은 72시간(3일), 초기고도는 1000 m, 300 m로 설정해 주었다. GDAS는 전 지구를 대상지역으로 설정한 모델 자료이며 공간 해상도는 1° , 시간 해상도는 6시간 간격의 기상자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 시료 채취일에 대해 6시간 간격으로 두 고도에서의 역궤적을 계산

하였기 때문에, 하나의 시료에 대해 총 8개의 역궤적이 계산되었다.

3. 결 과

3.1 PM_{2.5} 및 PM_{2.5-10} 농도 경향

전체 측정 기간 동안 대기 중 PM_{2.5} 농도는 춘천과 영월 지역에서 각각 30.4±14.1 µg m⁻³, 17.2±14.7 µg m⁻³로 각각 나타났으며(표 1), 춘천의 경우 연평균 대기환경기준인 25 µg m⁻³을 초과하였다. 또한 일평균 대기환경기준 50 µg m⁻³를 초과한 날은 춘천과 영월이 각각 22일(14.1%), 9일(5.5%)로 나타났다. PM₁₀의 경

우에도 춘천이 영월에 비해 약 1.7배 높은 59.6 µg m⁻³으로 나타났으며 연평균 대기환경기준을 초과하였다. PM₁₀의 일평균 대기환경기준을 초과한 날은 춘천의 경우 23일이 나타났으나 영월의 경우 단 2일만에 기준치를 초과하였다(표 2). 두 지역에서 PM_{2.5}와 PM₁₀의 대기환경기준을 초과한 시료에 대한 농도 평균값은 춘천이 영월에 비해 높았으며, PM_{2.5}와 PM₁₀의 기준을 동시에 초과한 시료는 춘천의 경우 12개, 영월의 경우 1개로 나타났다. 춘천에서 PM_{2.5} 기준치를 초과한 22개의 시료는 가을에 채취된 시료 3개, 봄에 채취된 시료 1개를 제외하고는 모두 겨울에 채취되었다. 춘천의 경우 PM_{2.5}의 최고 농도는 2014년 2월에 측정된 107.7 µg m⁻³으로 나타났고 PM₁₀의 최고 농도는 2013년 1월에

Table 1. Seasonally averaged concentrations of PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, and PM₁₀ concentrations. Note that the values given in parenthesis are the percentage of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in PM₁₀.

Period	Chuncheon (µg m ⁻³)				Youngwol (µg m ⁻³)			
	N	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}	N	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}
Spring	29	63.1 ± 29.6	27.1 ± 14.1 (42.9%)	36.0 ± 19.5 (57.1%)	27	54.2 ± 20.1	22.8 ± 13.9 (42.0%)	31.4 ± 18.3 (58.0%)
Summer	43	37.3 ± 16.0	17.2 ± 8.3 (46.2%)	20.1 ± 10.8 (53.8%)	50	25.7 ± 11.3	9.3 ± 6.9 (36.1%)	16.4 ± 10.1 (63.9%)
Autumn	34	54.3 ± 31.8	28.7 ± 19.9 (52.9%)	25.6 ± 17.5 (47.1%)	62	28.8 ± 11.7	13.8 ± 8.3 (48.1%)	14.9 ± 9.3 (51.9%)
Winter	50	80.4 ± 36.4	44.8 ± 24.5 (55.8%)	37.3 ± 28.3 (46.4%)	22	57.3 ± 28.6	37.9 ± 20.9 (66.2%)	19.4 ± 15.4 (33.8%)
2012 Spring	15	48.5 ± 21.5	24.5 ± 11.1 (50.5%)	24.0 ± 15.0 (49.5%)				
2012 Summer	25	32.4 ± 16.5	15.3 ± 8.2 (47.2%)	17.1 ± 9.7 (52.8%)	33	21.5 ± 8.8	7.7 ± 5.0 (35.7%)	13.8 ± 8.5 (64.3%)
2012 Autumn	3	37.4 ± 3.7	14.3 ± 11 (38.1%)	23.2 ± 14.7 (61.9%)	45	29.2 ± 12.1	13.8 ± 8.5 (47.2%)	15.4 ± 9.1 (52.8%)
2012 Winter	18	82.7 ± 35.4	37.3 ± 12.9 (45.1%)	45.4 ± 29.0 (54.9%)	22	57.3 ± 28.6	37.9 ± 20.9 (66.2%)	19.4 ± 15.4 (33.8%)
2013 Spring	14	78.7 ± 29.7	29.8 ± 16.7 (37.8%)	48.9 ± 15.2 (62.2%)	27	54.2 ± 20.1	22.8 ± 13.9 (42.0%)	31.4 ± 18.3 (58.0%)
2013 Summer	18	44.2 ± 12.7	20.0 ± 7.9 (45.2%)	24.3 ± 11.2 (54.8%)	17	33.9 ± 11.4	12.4 ± 9.1 (36.6%)	21.5 ± 11.4 (63.4%)
2013 Autumn	31	55.9 ± 32.8	30.1 ± 20.1 (53.9%)	25.8 ± 17.9 (46.1%)	17	27.5 ± 10.7	14.0 ± 7.9 (50.7%)	13.6 ± 9.7 (49.3%)
2013 Winter	32	79.1 ± 37.5	49.1 ± 28.3 (62%)	32.4 ± 27.1 (38.0%)				
Total	156	59.6 ± 33.9	30.4 ± 14.1 (51.3%)	29.7 ± 21.6 (49.7%)	161	36.0 ± 20.9	17.2 ± 14.7 (47.8%)	18.8 ± 13.6 (52.2%)

Table 2. Statistics of PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, and PM₁₀ concentrations exceeding the National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) of Korea at two sampling sites. The values given in the parenthesis are percentage of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in PM₁₀.

	Chuncheon ($\mu\text{g m}^{-3}$)				Youngwol ($\mu\text{g m}^{-3}$)			
	N	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}	N	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}
PM _{2.5} > 24hr-NAAQS	22	111.1	71.7 (65%)	39.4 (35%)	9	86.8	62.6 (72%)	24.2 (28%)
PM ₁₀ > 24hr-NAAQS	23	129.3	55.7 (43%)	73.6 (52%)	2	118.3	41.9 (35%)	76.5 (65%)
PM _{2.5} & PM ₁₀ > 24hr-NAAQS	12	133.2	76.3 (57%)	56.9 (43%)	1	135.6	63.8 (47%)	71.9 (53%)

측정한 $176 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 나타났다. 영월의 경우에는 PM_{2.5}와 PM₁₀의 최고 농도가 각각 2013년 3월에 측정된 $83.9 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 2013년 1월에 측정된 $135.6 \mu\text{g m}^{-3}$ 이다. 각 지역의 상위 10% 농도를 살펴보면 춘천은 영월에 비해 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 농도가 높은 것으로 나타났다(표 2).

전반적으로 춘천은 영월에 비해 PM_{2.5}와 PM₁₀이 모두 통계적으로 유의미하게 높은 값을 나타냈다(독립표본 T 검정, $p\text{-value} < 0.001$). 그러나 춘천의 경우 총 156개의 시료 중에 일반적으로 미세먼지의 농도가 높게 나타나는 봄과 겨울철의 시료 수가 79개로 약 50%를 차지하는 반면 영월은 총 161개의 시료 중에 봄과 겨울철의 시료 수가 30%밖에 차지하지 않기 때문에, 단순 비교하기는 어렵다. 따라서 동일한 계절에 대한 두 지역의 미세먼지 농도 차이를 분석하기 위하여 봄(3월, 4월, 5월), 여름(6월, 7월, 8월), 가을(9월, 10월, 11월), 겨울(12월, 1월, 2월)로 시료를 구분하였다. 춘천과 영월 두 지역 모두 공통적으로 봄과 겨울철에 고농도가 나타났으며 여름철에 저농도가 나타남을 확인할 수 있었다(ANOVA test, $p\text{-value} < 0.05$). 동일한 계절에 대해서 두 지역의 농도를 비교한 결과 4계절 모두 춘천이 영월에 비해 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도가 높게 나타남을 알 수 있었다(표 1). 연도별 경향성을 살펴보면, 춘천의 경우에는 2012년에 비해 2013년의 PM_{2.5} 농도가 전반적으로 더 높게 나타났으며, 특히 2012~13년 겨울철 PM_{2.5} 농도는 $49.1 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 2011~12년 겨울철 농도인 $37.3 \mu\text{g m}^{-3}$ 에 비해 훨씬 높은 값을 보였다.

PM_{2.5-10}의 농도를 파악하기 위해 PM₁₀의 측정값에서 PM_{2.5}의 측정값을 제하여 계산하였고, PM₁₀과 PM_{2.5}의 측정 장소가 충분히 가까워 공간적인 변이는 무시할 수 있다고 판단하였다. PM_{2.5}/PM₁₀의 비율은 춘천이 평균 51.3%, 영월이 평균 47.8%로, 통계적으로 춘천에서의 초미세입자 비율이 영월에 비해 더 높은 것으로 나

타났다(독립표본 T 검정, $p\text{-value} = 0.007$). 춘천에서 더 높은 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율이 나타난 이유에는 두 가지를 고려할 수 있다. 첫째, 춘천의 대규모 대기오염 배출시설의 부재로 인해 대기 중 미세먼지에 대한 2차 에어로졸의 기여도가 높을 것으로 추정되기 때문이다. 기존의 연구에서도 배출원에서 배출된 공기의 이동시간이 길어질수록(aging될수록) 2차 에어로졸의 기여도가 증가하는 것으로 나타났다(Kang *et al.*, 2011). 따라서 중국 및 수도권에서 배출된 오염물질이 춘천으로 유입되는 도중에 미세한 2차 에어로졸을 형성하여, 춘천의 PM_{2.5}의 농도를 증가시킨 것으로 판단된다. 특히 춘천은 빈번한 안개의 발생으로 인해 2차 에어로졸의 형성이 활발하게 나타날 수 있는데, 다양한 기상 조건이 PM_{2.5} 및 PM₁₀에 미치는 영향은 다음 장에서 더 논의하고자 한다. 둘째, 춘천에서 가장 높은 PM_{2.5} 배출량을 나타내는 일차 배출원은 도로이동오염원으로, 조대입자에 비해 PM_{2.5}의 비율이 높은 배출원 특성을 지닌다. 반면, 영월의 경우에는 가장 높은 미세먼지 배출원은 시멘트 및 석회 생산으로, 도로이동오염원에 비해 PM₁₀ 중 조대입자의 배출 비율이 높은 특징을 지닌다. 또한 시멘트 및 석회 생산 공정 중에는 시멘트 소성로(cement kiln)의 연소 과정 외에 시멘트 원료 및 생산품의 운반 및 포장 작업 등의 물리적 작업 역시 중요하기 때문에 조대입자의 비율이 상대적으로 더 높게 나타났다(Han *et al.*, 2015).

PM_{2.5}/PM₁₀ 비율의 계절적 특성을 살펴보면 춘천과 영월 두 지역 모두에서 가을과 겨울철이 봄과 여름철에 비해 높게 나타났고, 특히 영월의 경우는 계절적인 차이가 더욱 뚜렷하였다(표 1). 영월의 여름철에는 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율이 36%에 불과하였으나 겨울철에는 66%로 증가하여, 겨울철에는 기계적 파쇄 작업이나 자연적 배출원에서 주로 배출되는 PM_{2.5-10}에 비해 연소 과정에서 생성되는 PM_{2.5}의 농도가 크게 높아진 것

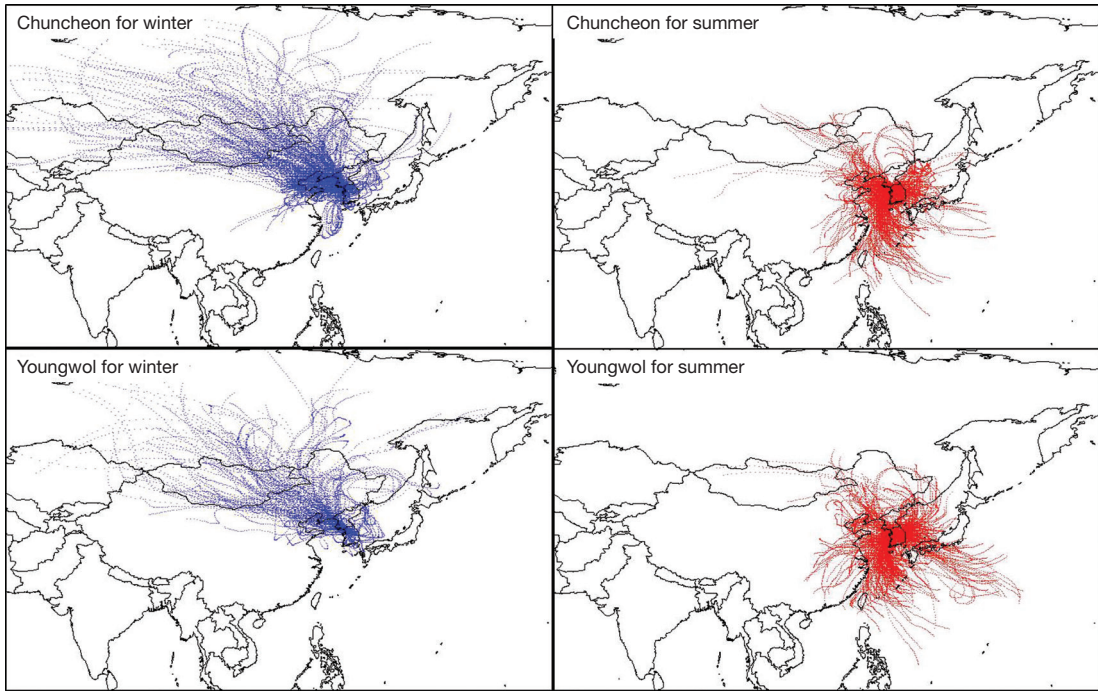


Fig. 1. Backward trajectories for Chuncheon and Youngwol during winter (left) and during summer (right).

으로 판단된다. 반면 봄과 여름의 경우 먼지의 재비산이나 황사 및 해양과 같은 자연적 배출원의 기여도가 커짐에 따라 $PM_{2.5-10}$ 의 비율이 높아지는 것으로 추정된다. 겨울과 여름철의 역궤적을 살펴보면, 겨울에는 중국에서 출발하여 수도권을 거쳐 춘천과 영월로 유입되어 인위적 배출원의 높은 기여도를 추정하게 하는 반면, 여름에는 다양한 방향에서 유입되고 있으며 다수의 역궤적이 해양으로부터 기인하기 때문에 조대입자의 비율이 커지는 것으로 판단된다(그림 1).

춘천과 영월의 $PM_{2.5}$ 와 $PM_{2.5-10}$ 의 상관성을 살펴보면 상관계수, R이 각각 0.25와 0.09로 춘천의 $PM_{2.5}$ 와 $PM_{2.5-10}$ 의 농도 경향의 상관성이 더 유의하게 나타났다(춘천의 상관성 검증 p-value < 0.01). 이 결과는 $PM_{2.5}$ 와 $PM_{2.5-10}$ 의 농도경향이 춘천에서는 통계적으로 유사하게 나타남을 의미하며, 이 두 모드의 미세먼지가 유사한 배출원 또는 생성원으로부터 기인한다는 것을 나타낸다. 반면, $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 사이의 상관계수와 $PM_{2.5-10}$ 과 PM_{10} 사이의 상관계수는 춘천과 영월 모두 높게 나타나($R > 0.7$) 두 모드 모두 PM_{10} 농도에 중요

한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

$PM_{2.5}$ 의 상위 20% 농도에 대한 CPF 결과, 춘천의 경우에는 북풍 또는 서풍이 불 때 고농도가 빈번하게 나타났다(그림 2). 춘천의 기상측정소의 동쪽에는 산이 가깝게 위치하고 있어 산이 근접한 동쪽을 제외한 남서, 북쪽 여러 방향에서 고농도가 발생할 수 있었으며 뚜렷한 근처 배출원의 영향은 보이지 않았다. 반면, 영월의 경우에는 시멘트 공장이 위치한 남쪽에서 바람이 불 때 고농도가 뚜렷하게 나타나는 경향을 보였다. 두 지역에서 측정된 PM_{10} 농도를 사용한 CPF 결과도 $PM_{2.5}$ 의 CPF 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 CPF는 지표면 풍향을 사용하므로 시료 채취 지점 근처에 위치한 오염원의 영향을 파악할 수 있으나, 근처의 높은 건물 등 지형의 영향을 받고 장거리 이동에 의한 영향은 살펴볼 수 없는 단점이 있다. 장거리 이동의 영향을 파악하기 위해서 $PM_{2.5}$ 의 상위 및 하위 20% 농도에 대한 역궤적을 계산하였다. 춘천과 영월 모두 하위 20%의 경우 우리나라 여름철의 동풍에서 유입되는 해양성 기단의 흐름을 확인할 수 있었으며 상위 20%의 경우에

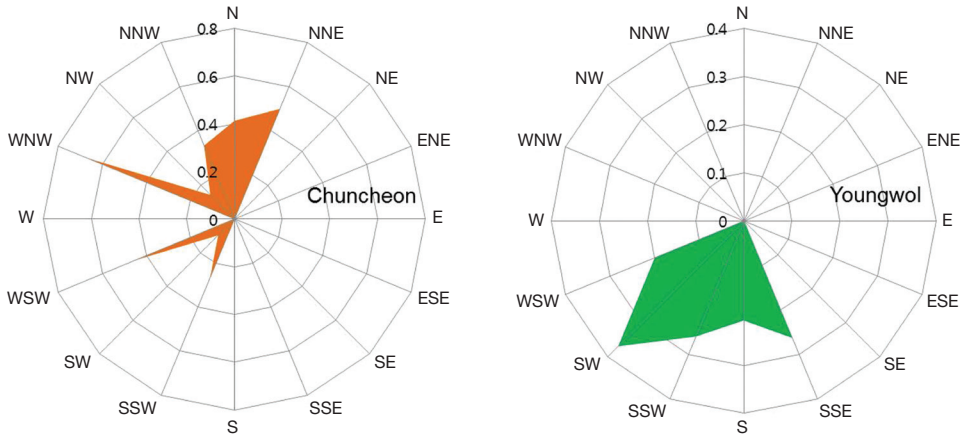


Fig. 2. CPF plots for the top 20% of PM_{2.5} concentrations for Chuncheon (left) and Youngwol (right).

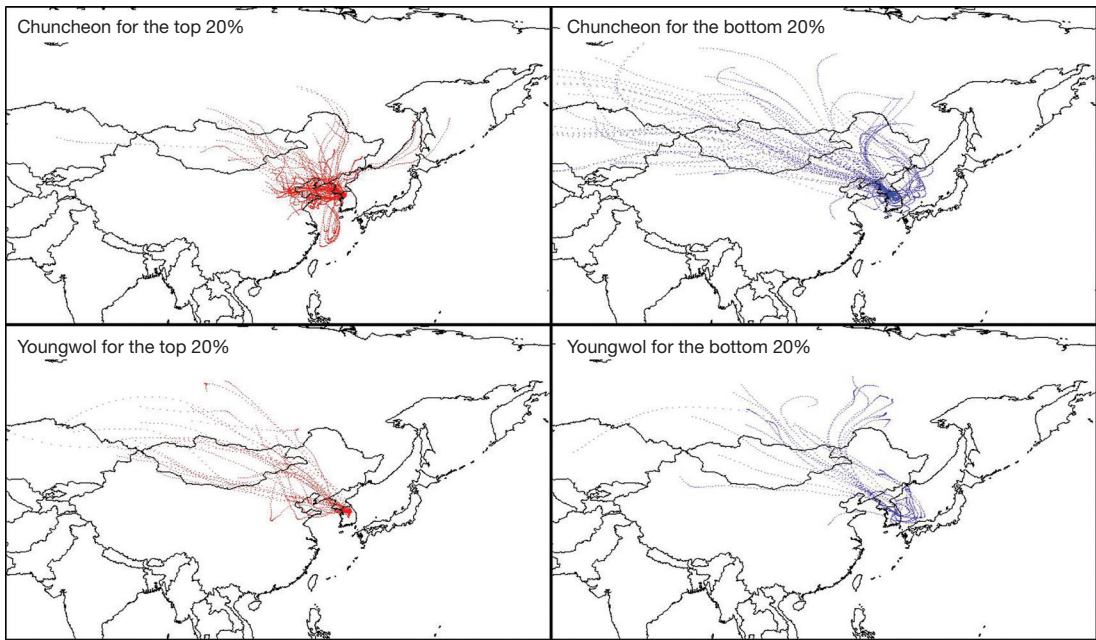


Fig. 3. Backward trajectories associated with the top 20% of PM_{2.5} concentrations (left) and the bottom 20% of PM_{2.5} concentrations (right) at two locations during winter time.

는 중국 동북부를 거쳐 유입되는 역궤적이 많았다.

그러나 춘천과 영월 모두 하위 20% PM_{2.5}는 주로 여름철에 나타나고 상위 20%의 PM_{2.5}는 주로 겨울철에 채취되었기 때문에, 상위 및 하위 20% PM_{2.5} 농도에 대한 역궤적 경로의 차이는 계절적 차이일 가능성이 존

재한다. 즉, 여름철에는 겨울철에 비해 많은 강우량과 높은 혼합고도 등 다른 기상요인에 의해 1차 대기오염 물질의 농도가 종종 낮아지기 때문에 반드시 중국으로부터의 장거리 이동이 춘천과 영월의 PM_{2.5} 고농도 현상을 야기한다고 단정지을 수 없다. 따라서 빈번하게

고농도가 나타나는 겨울철에만 국한하여 상위 20%와 하위 20% PM_{2.5}에 대한 역궤적을 계산하여 장거리 이동의 영향성을 살펴보았다(그림 3). 춘천의 경우 겨울철에 측정된 상위 20%에 해당하는 PM_{2.5} 시료와 연계된 역궤적은 대부분이 서쪽 및 북동쪽에서 시작되었고 하위 20%에 해당하는 역궤적은 동해(East Sea)에서 유입된 역궤적이 상대적으로 많아, 대기 중 PM_{2.5} 농도가 증가하는 데 있어 중국의 영향이 중요한 것으로 나타났다. 그러나 상위 20%에 해당되는 역궤적과 하위 20%에 해당되는 역궤적의 차이는 역궤적의 경로 길이에서도 뚜렷하게 차이가 났는데, 상위 20%에 해당되는 역궤적의 경로 길이가 상대적으로 더 짧아 전체적으로 대기가 정체된 상태에서 춘천의 PM_{2.5} 농도가 증가한 것으로 판단된다. 영월의 경우에는 역궤적의 경로 길이 차이는 나타나지 않았고, 하위 20%의 PM_{2.5} 농도와 연계된 역궤적은 다수가 동해로부터 유입된 것을 볼 수 있어 동쪽으로부터 유입되는 기단에 비해 서쪽에서 유입되는 기단과 PM_{2.5} 고농도가 연관되었다는 사실을 알 수 있다.

3.2 기상요인의 영향

3.2.1 온도

PM_{2.5}와 PM_{2.5-10}의 농도에 대한 온도의 영향을 파악하기 위해, 측정된 대기 온도의 범위를 7개 구간으로

분류하여 각 구간에 대한 미세먼지 농도의 평균을 계산하였다(그림 4). 두 지역 모두 낮은 온도 구간에서 PM_{2.5}의 고농도가 나타났으며 온도가 증가할수록 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 춘천과 영월 모두 PM_{2.5}와 대기 온도 사이에는 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 보였으며(Pearson 상관분석 p-value < 0.001.), 이는 겨울철에 고농도, 여름철에 저농도를 보이는 결과와 일치한다. 특히 영월 지역의 경우 기온이 0°C 이하일 때 PM_{2.5}의 농도가 크게 증가하는 현상이 더 뚜렷이 나타났다(그림 4). 반면 PM_{2.5-10} 농도는 춘천과 영월 모두 온도와의 상관성을 보이지 않았다. 이러한 현상은 온도가 낮은 겨울철에 연소과정에 의한 초미세먼지의 배출량이 높기 때문으로 판단된다. 특히 영월의 경우 0°C 이하의 온도에서 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율이 매우 높게 나타나, 겨울철 시멘트 공장에서 배출된 가스상 물질의 핵형성(nucleation) 후 응결(condensation)이 발생하여 대기 중에서 축적 모드(accumulation mode)로 성장했을 것으로 추정된다.

3.2.2 습도

PM_{2.5}와 PM_{2.5-10}의 농도에 대한 습도의 영향을 파악하기 위해 상대 습도의 구간별로 각 모드의 농도를 비교해보았다. 춘천의 경우는 상대습도가 증가할수록 PM_{2.5} 농도가 뚜렷이 증가하는 것으로 나타났으나 영월의 경우에는 가장 낮은 습도 구간(30~40%)을 제외

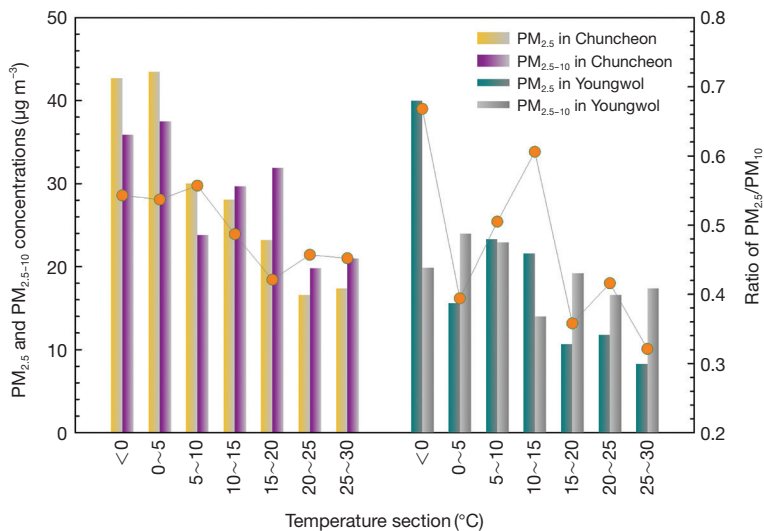


Fig. 4. Dependence of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} concentrations on the atmospheric temperature.

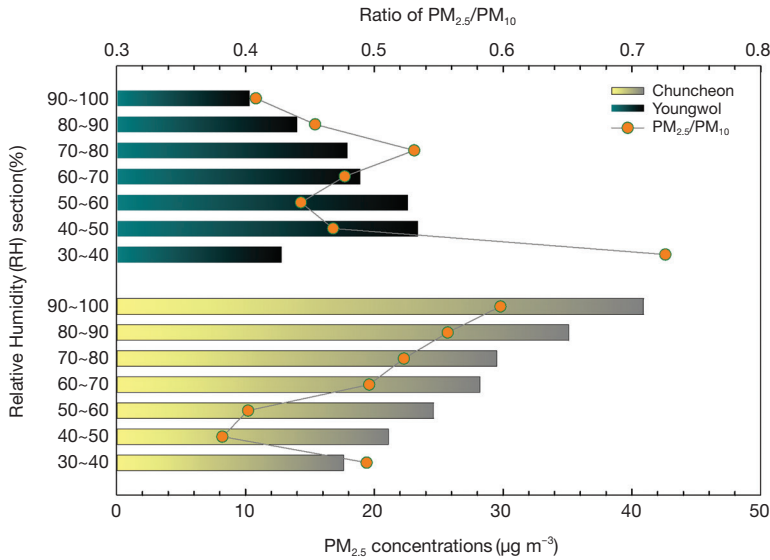


Fig. 5. Relationship between PM_{2.5} concentrations and relative humidity at both sites.

하고는 오히려 습도가 낮을수록 PM_{2.5} 농도가 증가하는 반대의 경향을 보였다(그림 5). 상대습도는 온도의 함수로서, 온도가 낮아질수록 수증기의 포화 증기압이 낮아져 상대습도는 증가하는 경향성을 나타내기 쉽다. 그러나 영월에서는 PM_{2.5} 농도에 대한 대기 온도의 영향성은 관측되었지만 상대습도 증가에 따른 PM_{2.5} 농도의 증가가 관측되지 않았기 때문에, 춘천에서 나타난 PM_{2.5}에 대한 상대습도의 영향성은 대기 온도에 따른 이차적 결과물이 아니라고 판단된다.

대기 중 수분은 대기화학 및 대기 역학에서 중요한 역할을 하는데, 춘천시의 경우 소양댐을 비롯하여 의암댐, 춘천댐 등으로 인해 빈번한 안개가 발생한다는 특징이 있다. 또한 춘천시에는 중대규모 대기오염 배출시설이 존재하지 않아 이차 에어로졸의 기여도가 높을 것으로 판단된다. 습도는 이차 유기에어로졸, 특히 방향족 휘발성 탄화수소로부터 형성되는 2차 유기 에어로졸의 형성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Jia and Xu, 2014; Kamens *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011; Healy *et al.*, 2009). 특히 Kamens *et al.*(2011) 및 Zhou *et al.*(2011)의 연구에서는 대기 중 수증기 액적이 증가할수록 이차 유기에어로졸의 형성이 증가한다는 것을 발견하였고, 최근의 Jia and Xu (2014)의 연구에서도 상대습도 60% 이상에서 에틸벤젠(ethylben-

zene)으로부터 기인하는 이차 유기에어로졸의 형성이 급격히 증가함을 보여주었다. 또한 Jung and Han (2008)의 연구에서는 가스상 이온이 높은 수분의 존재 하에서(e.g. 안개 생성 시) 2차 이온성 에어로졸의 농도가 크게 증가하는 것이 발견되었다. 2차 이온성 에어로졸의 증가 이유는, 전구물질인 HNO₃의 밤 시간 주요 생성 반응에 수증기가 관여할 뿐만 아니라, 높은 상대습도로 인해 형성된 이온성 에어로졸(e.g. (NH₄)₂SO₄, Na₂SO₄ 등)이 용해 임계치(deliquescence relative humidity: DRH)를 초과할 경우 고체 입자가 순간적으로 다량의 수분을 흡수하여 용액 상태로 존재하고 그 후 상대습도가 낮아지면 결정화가 일어나기 때문이다(Seinfeld and Pandis, 1998). PM_{2.5} 농도에 대한 안개의 영향성은 아래에서 더 자세히 논의된다.

PM_{2.5-10} 농도는 춘천 지역에서 상대습도에 따른 뚜렷한 경향성이 나타나지 않았고, 따라서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율도 상대습도가 증가함에 따라 증가하는 경향성을 보였다(그림 5). 이는 PM_{2.5-10}이 자연적 배출원 또는 기계적 과정에서 주로 배출되기 때문에 습도에 의한 2차 에어로졸의 형성과 무관하기 때문이다.

3. 2. 3 안개 및 황사

위에서 언급하였듯이 춘천은 소양호, 의암호, 춘천호

Table 3. Enhanced concentrations of PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, and PM₁₀ for various meteorological conditions. The values given in the parenthesis are percentage of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in PM₁₀.

	N	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}
Fog	20	82.0	44.4 (54%)	36.3 (44%)
Mist	18	59.1	33.4 (57%)	25.7 (43%)
Mist-Haze	17	96.0	55.1 (57%)	41.0 (43%)
Haze	2	126.2	49.4 (39%)	76.8 (61%)
Asian dust	1	114.0	32.6 (29%)	81.4 (71%)
Others	51	45.3	20.9 (46%)	25.7 (57%)

등 많은 호수로 둘러싸여 빈번한 안개를 발생시키며, 대기 중 습도는 2차 에어로졸의 형성에 중요한 영향을 미친다. 대기 중 습도와 관련된 현상으로는 안개(fog), 박무(mist), 연무(haze)가 있다. 안개, 연무 및 박무 구분의 기준은 시정거리와 상대습도이고, 시정거리가 1 km 이하의 경우 안개로 정의한다. 반면에 연무와 박무는 시정거리가 1~10km로, 연무는 상대습도가 70% 미만일 때, 박무는 상대습도가 80% 이상일 때로 구분하며, 상대습도가 70% 이상~80% 미만일 경우 선행 기상현상으로 물 현상이 관측되면 박무이고, 황사 같은 먼지현상이 관측되면 연무로 구분한다. 그리고 물 또는 먼지 현상이 관측되지 않으면 상대습도가 75% 이상 시 박무, 75% 미만 시 연무로 구분한다(Gwangju Regional Meteorological Administration, 2011). 본 연구의 측정 기간 동안 춘천에서는 안개 20회, 박무 18회, 연무 2회, 박무와 연무가 동시에 관측된 날(이하 박무-연무)은 17회가 발생하였다(표 3). 또한 황사가 1회 발생하였다.

안개, 박무, 연무가 발생한 날은 발생하지 않은 날(표 3에서 others에 해당함)에 비해 유의하게 높은 PM_{2.5} 농도가 관측되었다. 특히 박무와 연무가 동시에 발생하였을 때(mist-haze) 가장 높은 PM_{2.5} 농도를 나타냈다. 또한 안개, 박무, 박무-연무가 발생하였을 때는 모두 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율이 54~57%로 나타나, 발생하지 않은 날의 비율인 46%를 크게 초과하였다. 단, 연무가 나타났을 때는 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율이 39%로 낮은 값을 나타냈으나, 연구기간동안 단 2회 밖에 관측되지 않아 대표성을 띠다고 보기 어렵다. 또한 연무는 안개와 박무에 비해 상대습도가 상대적으로 낮을 때 발생하는 현상으로 정의되기 때문에, 안개와 박무에 비해

대기 중 수증기의 영향이 낮게 고려된다. 따라서 대기 중 수증기의 액적에 의한 2차 에어로졸(PM_{2.5}로 존재하는)의 형성에 연무가 가장 적은 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 또한 기상청에서 상대습도가 70% 이상~80% 미만일 경우 선행기상현상으로 황사 같은 먼지 현상이 관측되면 연무로 구분하기 때문에, 연무 발생 시에 PM_{2.5}와 PM_{2.5-10}이 가장 고농도를 보였다고 판단된다(표 3). 이는 연무가 발생하였기 때문에 PM_{2.5} 및 PM_{2.5-10}의 농도가 증가한 것이 아니라, (초)미세먼지의 농도가 증가된 상태이기 때문에 기상청에서 연무가 발생했다고 판단한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 대기 중 수분에 의한 이차 유기 및 무기 에어로졸의 증가는 안개와 박무 현상이 발생했을 때 관측된다고 판단되며, 이러한 결과는 표 3에 나타난 바와 같이 안개 및 박무가 발생하였을 때의 높은 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율 및 PM_{2.5}의 농도 증가로 뒷받침된다.

황사가 발생하였을 때에는 아무 현상도 발생하지 않은 날(표 3의 others)에 비하여 높은 PM_{2.5} 및 PM_{2.5-10} 농도가 나타났으나, 특히 조대입자의 농도가 크게 증가하여 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율이 29%에 불과하였다. 황사 발생 시 측정된 PM_{2.5-10}의 농도는 81.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 평소에 비해 3배 이상 높은 값이 나타났다.

3. 2. 4 풍속

PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도에 대한 풍속의 영향을 알아보기 위해 풍속 구간별 미세먼지 농도를 나타내었다(표 4). 춘천은 가장 낮은 풍속인 0.5~1 m s⁻¹ 구간에서 가장 높은 PM_{2.5}와 PM_{2.5-10} 평균 농도가 나타났고, 이후 감소하다가 다시 풍속이 증가할수록 증가하는 U자형 특성을 나타냈다. PM_{2.5-10}의 농도는 최대 풍속 구간(2.5~3 m s⁻¹)에서 가장 높은 농도를 나타냈다. 춘천은 중대규모 국지 배출원이 존재하지 않기 때문에, 풍속이 낮을 때 대기 정체로 인하여 미세먼지의 농도가 증가하는 경향이 강하게 나타났다. 또한 풍속이 높을 때는 중국 및 수도권 등 춘천 외부로부터의 미세먼지 유입량이 높아져 PM_{2.5} 및 PM_{2.5-10}의 농도가 증가하는 것으로 판단된다. 반면 영월의 경우에는 미세입자 모드와 조대입자 모드에 대해서 풍속이 뚜렷한 영향을 미치지 못했다. 영월은 시로 채취 장소로부터 약 600 m 떨어진 현대 시멘트 공장을 비롯하여 다양한 국지적 배출원이 존재하기 때문에, 국지적 오염원에 비해 외

Table 4. Dependence of PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, and PM₁₀ concentrations on wind speed. The values given in the parenthesis are percentage of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in PM₁₀.

WS(m s ⁻¹)	Chuncheon(μg m ⁻³)			Youngwol(μg m ⁻³)		
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}
<0.5				37.1	18.7 (50.4%)	18.4 (49.6%)
0.5~1	73.1	39.3 (53.8%)	33.8 (46.2%)	33.3	15.5 (46.4%)	17.9 (53.6%)
1~1.5	53.0	26.5 (50.1%)	26.9 (50.7%)	41.2	20.7 (50.4%)	20.4 (49.6%)
1.5~2	39.6	16.5 (41.7%)	25.3 (63.8%)	36.8	15.7 (42.8%)	21.1 (57.2%)
2~2.5	42.4	19.7 (46.5%)	22.7 (53.5%)	51.4	26.5 (51.6%)	24.9 (48.4%)
2.~3	66.2	20.3 (30.7%)	45.8 (69.3%)	37.6	16.3 (43.4%)	21.3 (56.6%)
3~3.5				44.5	19.5 (43.8%)	25.0 (56.2%)

부로부터 유입되는 미세먼지의 기여도가 춘천에 비해 상대적으로 낮을 것으로 추정된다. 따라서 미세먼지 농도에 미치는 풍속의 영향도 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

3.3 주성분 분석(Principal Component Analysis) 및 고농도 시료의 특성

춘천과 영월에서 측정된 미세먼지와 기상요소, 그리고 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO)를 포함한 가스상 물질의 농도를 이용하여 주성분 분석(PCA)을 실시하였다(표 5). 춘천의 PCA 분석 결과로 4가지 요인이 추출되었으며(고유값>1) 전체 분산의 84.9%를 설명할 수 있었다. 첫 번째 주성분은 전체 분산의 41.7%를 차지하며 PM_{2.5}와 PM₁₀, 기온, SO₂, NO₂ 사이에 공통성이 큰 것으로 나타났다. 즉, 기온이 낮을 때 도로이동오염원을 포함한 화석연료 연소로 인해 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도가 증가한 것으로 판단된다. 춘천에서 가장 높은 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 배출량을 지닌 배출원은 도로이동오염원과 음식료품 제조업 연소로서(비산먼지와 생물성 연소 제외), 이들로부터의 배출이 첫 번째 주성분에 의해 설명된 것으로 판단된다. 두 번째 주성분은 19.9%를 차지하며 PM_{2.5-10}과 PM₁₀ 농도 사이의 뚜렷한 공통된 경향성을 볼 수 있으나, PM_{2.5}에 대해서는 낮은 계수를 보인다. PM_{2.5-10}에 비해 PM_{2.5}의 계수가 낮은 결과는, 해당 요인이 제어장치가 설치된 인위적 연소 배출원이 아니라는 것을 의미하는 동시에, NO₂와의 상당히 높은 공통성은 연소성 배출원이라는 사실을 의미한다. 강원도의 생물성 연소 배출량은 제조업 연소 다음으로 높은 배출량을 나타낸다(환경부 통계포탈, 2012). 따라서 두 번째 주성분은 노천에서 이루어

지는 바이오매스 소각 또는 도로변 재비산으로 판단된다. 세 번째 주성분은 높은 상대습도(RH)와 낮은 풍속이 나타날 때 PM_{2.5} 농도가 증가하는 경향성을 나타내고 2차 에어로졸의 전구물질인 NO₂도 0.414의 계수값을 나타내기 때문에 2차 에어로졸의 생성으로 판단되며, 전체 분산의 12.2%를 설명하였다. 네 번째 주성분은 PM_{2.5}나 PM_{2.5-10}의 농도와는 상관이 없으며 CO의 농도만이 독립적으로 추출되어, PM_{2.5} 및 PM₁₀의 배출량은 상대적으로 낮지만 높은 CO 배출량을 갖는 주거, 상업 및 공공기관시설의 비산업 연소(2012 CAPSS 자료)를 나타낸다고 추정할 수 있다.

영월의 PCA 분석 결과도 4가지 주성분을 추출하였으며 전체 분산의 79.4%를 설명하였다. 전체 분산의 37.7%를 설명하는 첫 번째 주성분만으로 PM_{2.5} 농도 분산의 대부분을 설명할 수 있었는데, 기온이 낮을 때 NO₂와 공통된 경향성을 나타냈다. CAPSS 자료에 의하면 영월군에서 가장 미세먼지 배출량이 높은 배출원은 시멘트 및 석회 생산에 대한 제조업 연소이고, 이 배출원에서 배출되는 주요 가스상 오염물질 중 NO_x의 배출량이 가장 크게 나타났다. 따라서 첫 번째 주성분의 경우 영월의 미세먼지 배출량의 가장 큰 부분을 차지하는 시멘트 및 석회 생산에 대한 제조업 연소로 인해 PM_{2.5}의 농도가 증가하는 것을 나타냈다고 판단된다. 두 번째 주성분은 NO₂와 PM_{2.5-10}의 농도가 뚜렷한 공통성을 가지는 것으로 나타났다. 첫 번째 주성분이 기온이 낮을 때 시멘트 공장의 연소 과정에서 배출되는 가스상 오염물질의 응축 및 응결 작용으로 인한 에어로졸 생성으로 인한 PM_{2.5} 농도의 증가를 설명한 것이라면, 두 번째 주성분은 시멘트 공장에서의 파쇄, 포장 등 물리적 작업에 의한 초대입장의 농도 증가를 설

Table 5. Factor loadings in atmospheric pollutants including fine aerosols at the two locations from PCA.

	Chuncheon				Youngwol			
	1	2	3	4	1	2	3	4
PM _{2.5}	.661	.373	.407	-.036	.949	.075	-.037	.022
PM ₁₀	.458	.846	.198	-.015	.678	.676	-.128	.022
PM _{10-2.5}	.068	.958	-.089	.012	.013	.959	-.157	.011
TEMP	-.872	-.166	-.003	-.151	-.722	.041	.461	-.186
RH	-.098	-.113	.866	-.006	-.169	-.220	.813	-.007
WS	-.111	-.164	-.848	.061	-.006	-.020	-.833	-.232
SO ₂	.815	.006	-.319	-.103	-.171	-.209	.266	.782
NO ₂	.732	.418	.414	.114	.572	.491	.078	-.030
CO	.053	.002	-.052	.988	.334	.240	-.040	.778
Variance explained (%)	41.7	19.9	12.2	11.1	37.7	18.8	12.8	10.1

Table 6. Characteristics of high concentration events for PM_{2.5} and PM_{2.5-10}.

	Temp. (°C)	RH (%)	WS (m s ⁻¹)	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	CO (ppm)
Chuncheon						
PM _{2.5} > 50 µg m ⁻³	-0.8	79	0.8	9.5	37.7	1.2
PM _{2.5-10} > 50 µg m ⁻³	5.8	71	1.1	7.4	30.6	0.9
Average for whole sampling period	10.1	71	1.1	5.4	20.1	0.7
Youngwol						
PM _{2.5} > 50 µg m ⁻³	-5.3	70	0.5	8.2	37.1	1.3
PM _{2.5-10} > 50 µg m ⁻³	11.8	62	1.3	5.3	33.5	1.0
Average for whole sampling period	14.4	73	0.8	6.9	17.3	0.9

명한 것으로 판단된다. 세 번째와 네 번째 주성분은 미세먼지 농도와 관련이 없는 것으로 나타났다.

이러한 주성분 분석 결과는 고농도 시료의 특성을 잘 설명해준다. 춘천과 영월 두 지역에서 각각 PM_{2.5}와 PM_{2.5-10}의 고농도가 나타났을 때 풍속, 상대습도, SO₂, NO₂, CO의 농도 특성을 비교해보면 표 6과 같다. 춘천에서 24시간 대기환경기준인 50 µg m⁻³ 이상의 PM_{2.5} 농도를 나타낸 기간에는 평균 온도가 -0.8°C로 주로 겨울철에 고농도의 PM_{2.5}가 관측되었음을 알 수 있었다. 또한 풍속은 시료 채취 기간 전체의 평균인 1.1 m s⁻¹에 비해 낮은 0.8 m s⁻¹이 나타나, 저풍속일 때 약한 수평 및 수직 혼합으로 인해 PM_{2.5} 농도가 증가함을 알 수 있었다. 또한 고농도 PM_{2.5} 기간에 측정된 SO₂와 NO₂ 농도는 전체 시료 채취 기간의 평균값에 비해 각각 1.8배, 1.9배 높은 농도를 나타냈으며 CO의 농도는 약 1.2배 증가한 값을 나타내었다(표 6). 이러한 결과는 표 5에 제시된 첫 번째 주성분을 뒷받침한다. 또한 고농도 PM_{2.5} 기간에는 평균 상대습도가 79%로 나타

나 전체 기간 동안의 평균 상대습도인 71%에 비해 높은 값을 나타내어, 높은 상대습도가 PM_{2.5}의 고농도를 야기한 것으로 파악할 수 있다. 반면, PM_{2.5-10}의 농도가 50 µg m⁻³ 이상일 때에는 평균 온도가 5.8°C, 풍속이 1.1 m s⁻¹, 그리고 상대습도가 71%로 나타나, 온도와 풍속이 PM_{2.5-10}의 농도에 미치는 영향이 PM_{2.5}에 미치는 영향보다 낮으며 상대습도의 영향은 없는 것으로 나타났다. 또한 PM_{2.5-10}의 고농도 기간에 SO₂와 NO₂의 평균 농도는 전체 시료 채취 기간 동안의 평균 농도에 비해 높은 값을 나타냈지만, PM_{2.5} 고농도 기간보다는 낮은 값을 나타내어 화석 연료 연소의 영향이 상대적으로 낮게 나타났다.

영월의 경우에도 춘천과 마찬가지로 고농도의 PM_{2.5} 기간에는 낮은 기온과 풍속, 그리고 높은 NO₂의 농도(전체 시료 채취 기간의 평균 NO₂ 농도의 2.1배)가 나타났다. 상대습도의 영향은 없는 것으로 나타났다(표 6). 또한 전체 시료 채취 기간의 평균 농도에 비하여 SO₂ 농도와 CO의 농도도 각각 1.2배와 1.5배 증가하

여, 영월에서 나타난 고농도의 $PM_{2.5}$ 는 SO_2 보다 NO_2 와 CO의 농도와 공통된 경향성이 더 높은 것으로 나타났다. $50 \mu g m^{-3}$ 을 초과하는 $PM_{2.5-10}$ 의 농도가 나타났을 때에는 풍속이 $1.3 m s^{-1}$ 로 시료 채취 전체 기간 동안의 평균 풍속인 $0.8 m s^{-1}$ 에 비해 상당히 높은 값이 나타났으며, 낮은 상대습도(62%)와 높은 NO_2 농도(전체 시료 채취 기간 평균 농도의 1.9배)가 나타나 시멘트 및 석회 생산 공장에서의 파쇄, 운반 및 포장 등과 같은 물리적 과정에 의해 발생하는 조대입자가 낮은 상대습도에서 재비산되어 고농도를 야기한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 고찰

강원도는 인구수는 적으나 대규모의 시멘트 및 석회 공장이 위치해 있어 미세먼지 배출량이 높은 지역이다. 본 연구에서는 시멘트 및 석회 공장에서의 배출로 인해 강원도 내에서 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 배출량이 가장 높은 영월군과 중대규모 점오염원이 존재하지 않는 춘천시에서 약 2년간 미세먼지 농도를 측정하여 그 특성을 파악하였다. 전체 측정 기간 동안의 평균 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도는 영월보다 춘천에서 더 높게 나타났으며, 춘천의 경우 연평균 $PM_{2.5}$ 대기환경기준인 $25 \mu g m^{-3}$ 을 초과하는 농도값($30.4 \pm 14.1 \mu g m^{-3}$)이 관측되었다. 두 지역 모두 공통적으로 봄과 겨울철에 고농도, 여름철에 저농도가 나타났으며, 4계절 모두 춘천이 영월에 비해 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도가 높게 나타났다. $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율은 춘천이 영월보다 높게 나타났는데, 이는 춘천에서 빈번한 안개와 장거리 이동 오염물질의 유입으로 인한 2차 에어로졸의 기여도가 높기 때문으로 판단된다. 반면 영월의 경우에는 측정소 남쪽에 위치한 시멘트 공장으로부터 바람이 불어올 때 뚜렷하게 높은 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 농도를 관측할 수 있어 1차 에어로졸의 기여도가 크다고 판단된다.

두 지역에서 측정된 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도에 대해 기상요인이 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해 각 기상요인의 범위를 몇 개의 구간으로 분류하여 각 구간에 대한 미세먼지 농도를 계산하였다. 먼저 두 지역 모두 낮은 온도 구간에서 $PM_{2.5}$ 의 고농도가 나타났으며 $PM_{2.5-10}$ 농도는 온도와 관계가 보이지 않았다. 습도의 영향은 두 지역이 뚜렷이 다르게 나타났는데, 중대

규모 배출시설이 없는 춘천의 경우 상대습도가 증가할수록 $PM_{2.5}$ 농도와 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율이 증가하는 것으로 나타나 춘천에 위치한 많은 댐으로 인한 대기 수분이 이차 에어로졸의 형성을 촉진시키는 것으로 판단된다. 또한 춘천에서 빈번하게 발생하는 안개와 박무 현상 역시 대기 중 $PM_{2.5}$ 농도와 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율을 증가시키는 것으로 나타났다. 반면, 영월에서는 상대습도가 가장 낮은 구간을 제외하고는 오히려 습도가 낮을수록 $PM_{2.5}$ 농도가 증가하는 반대의 현상을 보였다. 춘천과 영월에서 고농도 시료만 추출해서 특징을 분석해보면, 춘천에서는 주로 겨울철에, 저풍속일 때, 높은 상대습도가 나타났을 때, 그리고 높은 NO_2 농도가 나타났을 때 $PM_{2.5}$ 의 고농도가 나타났다. 반면 춘천에서 측정된 고농도의 $PM_{2.5-10}$ 시료에 대해서는 온도와 풍속의 영향이 $PM_{2.5}$ 에 미치는 영향보다 낮고 상대습도의 영향은 관측되지 않았다. 영월의 경우에도 낮은 기온과 낮은 풍속, 그리고 높은 NO_2 농도가 나타났을 때 고농도의 $PM_{2.5}$ 가 관측되었으나 상대습도의 영향은 없었다. 반면 고농도의 $PM_{2.5-10}$ 시료가 채취되었을 때는 오히려 평균보다 높은 풍속이 나타났고 낮은 상대습도와 높은 NO_2 농도가 나타나, 시멘트 및 석회 생산 공장에서의 파쇄, 운반, 및 포장 등의 물리적 과정에 의해 발생하는 조대입자가 높은 풍속과 낮은 상대습도에서 재비산되어 고농도를 야기한 것으로 판단된다.

이러한 뚜렷이 다른 두 지역의 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 농도 특성은 주성분 분석을 통해서도 나타났다. 춘천의 경우 높은 상대습도와 낮은 풍속이 나타날 때 $PM_{2.5}$ 농도가 증가하는 공통성, 즉 2차 에어로졸을 나타내는 주성분이 추출되었으나, 영월의 경우에는 $PM_{2.5}$ 농도 분산의 대부분을 설명하는 주성분이 높은 음의 값을 가진 기온과 높은 양의 값을 가지는 NO_2 및 $PM_{2.5}$ 를 공통적으로 추출하여, 겨울철 시멘트 및 석회 생산에 대한 제조업 연소가 $PM_{2.5}$ 농도 경향을 결정하는 주요 배출원임을 알 수 있었다. 두 지역 모두 공통적으로 $PM_{2.5-10}$ 의 분산을 설명하는 주성분에서는 기온, 풍속, 상대습도 등이 기상요인과의 공통성이 추출되지 않았다. 본 연구에서 파악된 두 지역에서의 미세먼지 농도 경향과 기상요인과의 관련성은, 두 지역의 미세먼지 농도 특성이 뚜렷이 다르다는 것을 나타내며, 따라서 미세먼지 농도 저감 정책을 수립할 때 다르게 접근해야 한다는 것을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술개발사업단[MPSS-자연-2015-81] 및 2015년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호-D1000444-01-01)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Aldabe, J., D. Elustondo, C. Santamaría, E. Lasheras, M. Pandolfi, A. Alastuey, X. Querol, and J.M. Santamaría (2011) Chemical characterisation and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ at rural, urban and traffic sites in Navarra (North of Spain), *Atmos. Res.*, 102(1), 191-205.
- Gwangju Regional Meteorological Administration (2011). http://blog.naver.com/kj_nalssi/20123700977
- Han, Y.J., H.W. Kim, S.H. Cho, P.R. Kim, and W.J. Kim (2015) Metallic elements in PM_{2.5} in different functional areas of Korea: Concentrations and source identification, *Atmos. Res.*, 153, 416-428.
- Healy, R.M., B. Temime, K. Kuprovskytė, and J.C. Enger (2009) Effect of Relative Humidity on Gas/Particle Partitioning and Aerosol Mass Yield in the Photooxidation of p-Xylene, *Environ. Sci. Technol.*, 43, 1884-1889.
- Jia, L. and Y. Xu (2014) Effects of Relative Humidity on Ozone and Secondary Organic Aerosol Formation from the Photooxidation of Benzene and Ethylbenzene, *Aerosol. Sci. Technol.*, 48, 1-12.
- Jung, J.H. and Y.J. Han (2008) Study on Characteristics of PM_{2.5} and Its Ionic Constituents in Chuncheon, Korea, *J. KOSAE*, 24(6), 682-692. (in Korean with English abstract)
- Kamens, R.M., H. Zhang, E.H. Chen, Y. Zhou, H.M. Parikh, R.L. Wilson, K.E. Galloway, and E.P. Rosen (2011) Secondary organic aerosol formation from toluene in an atmospheric hydrocarbon mixture: Water and particle seed effects, *Atmos. Environ.*, 45, 2324-2334.
- Kang, E.H., W.H. Brune, S.W. Kim, S.C. Yoon, M.H. Jung, and M.H. Lee (2011) Secondary aerosol forming potential of air masses observed at Jeju, Korea : Experimental Potential Aerosol Mass (PAM) chamber study, *APJAS.*, Vol. 2011 No. 10-2 [2011].
- Myles, L., R.J. Dobosy, T.P. Meyers, and W.R. Pendergrass (2009) Spatial variability of sulfur dioxide and sulfate over complex terrain in East Tennessee, USA, *Atmos. Environ.*, 43, 3024-3028.
- Myles, L., W.R. Pendergrass, C.A. Vogel, A. Yerramilli, V.B.R. Dodal, B.R. Dodla, H.P. Dasari, V.S. Challa, F. Tuluri, J.M. Baham, R. Hughes, C. Patrick, J. Young, and S.J. Swainer (2010) J3. 4 Evaluation of PM_{2.5} source regions over the Mississippi Gulf Coast using WRF/HYSPLIT modeling approach. 16th Conference on Air Pollution Meteorology, 17-21 January 2010, Atlanta, GA, USA.
- Pandolfi, M., Y.G. Castanedo, A. Alastuey, J.D. ed la Rosa, E. Mantilla, A.S. de la Campa, X. Querol, J. Pey, F. Amato, and T. Moreno (2011). Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: impact of shipping emissions, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 18(2), 260-269.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, New York, pp. 239-244, 507-508, 531-537.
- Song, Y., X. Wang, B.A. Maher, F. Li, C. Xu, X. Liu, X. Sun, and Z. Zhang (2016) The spatial-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China, *J. Clean. Prod.*, 112, 1312-1318.
- U.S. EPA (1999) Compendium Method IO-4.2; Determination of reactive acidic and basic gases and strong acidity of atmospheric fine particles ($2.5\ \mu\text{m}$), EPA/625/R-96/010a.
- Zhou, Y., H. Zhang, H.M. Parikh, E.H. Chen, W. Ratanavaraha, E.P. Rosen, W. Wang, and R.M. Kamens (2011) Secondary organic aerosol formation from xylenes and mixtures of toluene and xylenes in an atmospheric urban hydrocarbon mixture: Water and particle seed effects (II), *Atmos. Environ.*, 45, 3882-3890.