

논문

측정망 자료를 이용한 강원지역 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 시간변화 및 공간 분포

차승환, 한영지^{1),*}, 배귀남²⁾

강원대학교 환경학과, ¹⁾강원대학교 환경융합학부 에코환경과학전공

²⁾한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단

Spatio-temporal Distribution of PM₁₀ and PM_{2.5} in Gangwon Province of South Korea Using Air Pollution Monitoring Network Data

접수일 2020년 7월 20일

수정일 2020년 8월 4일

채택일 2020년 8월 6일

Received 20 July 2020

Revised 4 August 2020

Accepted 6 August 2020

*Corresponding author

Tel : +82-(0)33-250-8579

E-mail : youngji@kangwon.ac.kr

Seung-Hwan Cha, Young-Ji Han^{1),*}, Gwi-Nam Bae²⁾

Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Science, School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do, Republic of Korea

²⁾Center for Environmental Health and Welfare Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

Abstract Fine particulate matter (PM) is proven to be strongly linked to human health. Although the emissions of PM from anthropogenic sources are relatively low in Gangwon Province, the atmospheric concentrations of both PM_{2.5} and PM₁₀ were reported to be very high. In this study, spatio-temporal distributions of PM_{2.5} and PM₁₀ were identified based on the hourly concentrations obtained from national air pollution monitoring network. Gangwon Province can be divided into four regions with different weather and emission characteristics. All monitoring sites showed a decreasing trend in both PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations from 2015 to 2019. There were statistically higher concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ in the western area than in the eastern area. The correlation of PM_{2.5} between western and eastern regions was relatively low, indicating that the emissions and/or formation pathways affecting PM_{2.5} were different in two regions. The difference between PM_{2.5} in the western and eastern regions was large in winter and small in summer. This result possibly indicates that PM_{2.5} in western area is likely to be affected by regional- or long-range transport of PM_{2.5} or its precursors emitted from metropolitan and industrial areas of Korea and China when the westerly winds are predominant in winter. Similar diurnal patterns of PM_{2.5} and PM₁₀ were shown at most monitoring sites; however, the morning and evening peaks due to traffic rush hour were observed in relatively large cities while the diurnal variation was relatively unclear in small cities.

Key words: PM_{2.5}, PM₁₀, Gangwon Province, Spatio-temporal distribution, Long-range transport, Diurnal variation

1. 서론

미세먼지 (PM₁₀) 및 초미세먼지 (PM_{2.5})는 인체의 호흡기 및 심혈관계 질환 등을 야기하고 시정을 악화시키며 기후변화에 영향을 미친다고 알려져 있다 (Myong, 2016; Kim *et al.*, 2015). PM₁₀ 및 PM_{2.5}는 다양한 자연적 및 인위적 배출원에서 기원하고, 대기

중 화학반응에 의해 2차적으로 생성되기도 한다. 우리나라의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도는 미국, 유럽, 일본 등의 다른 지역과 비교하여 높은 값을 나타낸다. 또한, 중국으로부터의 장거리 이동 영향이 중요하다는 특징이 있지만, 그 기여율에 있어서는 연구마다 다소 다른 결과를 나타낸다 (Park and Shin, 2017; Kim *et al.*, 2015).

우리나라에서 운영되는 도시대기측정망에는 현재 전국 398개의 측정소가 존재하며, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 한 시간 간격 농도를 제공하고 있다. 강원도는 1988년 원주 중앙동에 측정소가 처음 설치되었으며, 이어 춘천, 강릉, 동해, 삼척 등에 설치하여 현재 21개 도시 대기측정소가 존재하지만, 여전히 서울과 경기도 등에 비해 면적당 측정소 개수가 현저하게 적다. 강원도는 청정환경이라는 인식이 강하고 대도시 또는 대규모 산업단지가 존재하지 않아, PM₁₀ 및 PM_{2.5}에 대한 연구가 활발히 진행되지 않았다. 2018년 국립환경과학원에서 강원도 지역을 대상으로 분석한 보고서(NIER, 2018)에 따르면, 과거 10년 동안의 원주, 춘천, 강릉의 연도별 PM₁₀ 농도는 수도권과 비교하여 유사하거나 높은 농도 수준을 보였으며, 특히 원주는 고농도가 빈번하게 발생하는 것으로 나타났다. 국가통계포털에서 제공하는 미세먼지 월별 대기 오염도 데이터를 이용한 4개년(2015~2018)간 강원도의 미세먼지 농도 순위는 17개의 지자체 중 PM₁₀은 평균 8위, PM_{2.5}는 평균 6위를 기록하였다. 또한 강원도의 우심지역(원주, 춘천, 강릉)의 농도를 세분화하여 타 지자체와 비교한 결과, 원주는 2016년부터 2018년까지 연도별 PM_{2.5} 평균농도는 가장 높은 값을 보여주었으며, PM₁₀ 또한 전국에서 1위 또는 2위의 농도 수준을 보여주었다. 그러나 2015년부터 2017년까지 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS)의 국가 대기오염물질 배출량 통계에 따르면, 강원도의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 배출량은 각각 우리나라 전체 배출량의 $4.5 \pm 0.5\%$ 및 $4.6 \pm 0.7\%$ 에 불과하였다.

강원도에서 채취한 PM_{2.5}의 화학적 성분에 대한 연구는 소수에 불과하다. Cho *et al.* (2016)는 중대규모 점오염원이 존재하지 않는 춘천시와 시멘트 공장이 존재하는 영월군을 대상으로 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도를 측정하였는데, 춘천의 경우 안개가 발생하거나 상대습도가 증가할수록 PM_{2.5}의 농도가 뚜렷이 증가하는 경향을 보였고, 특히 유기탄소(organic carbon, OC)와 질산염의 농도 및 기여율이 크게 증가하였다.

이 결과는 중대규모 일차배출원이 존재하지 않는 지역에서는 안개 발생과 상대습도 등 기상요인이 2차 유·무기 에어로졸 생성에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다. 반면 영월의 경우 오히려 습도가 낮을수록 PM_{2.5} 농도가 증가하는 반대의 경향을 보였으며, 시멘트 공장에서 배출되는 중금속(As, Pb, Mn, Cd, Zn 등)의 기여율이 상대적으로 높게 나타났다(Han *et al.*, 2015).

미세먼지의 중요성이 커지고 사회적으로 큰 이슈가 되면서, 서울(Kim *et al.*, 2014; Bae *et al.*, 2013), 부산(Son and Kim, 2009), 대구(Ju and Hwang, 2011), 광주(Park *et al.*, 2020)를 비롯한 많은 도시에서 측정망 자료를 이용하여 대기질을 분석한 선행 연구 사례들이 다수 존재한다. 이외에도, Kim and Kim (2013) 및 Yu *et al.* (2018)의 연구에서는 측정소의 자료를 사용하여 전국 권역별 PM_{2.5} 농도의 특징 및 변화 추이를 분석한 바 있다. 강원도의 경우 미세먼지의 농도가 상당히 높음에도 불구하고, 강원도 내 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 시·공간 분포를 파악한 연구가 진행된 바 없다. 본 연구에서는 도시대기측정망에서 PM_{2.5}의 농도가 측정되기 시작한 2015년부터 2019년까지 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도의 시간별 추세 및 공간분포 특성을 파악하여, 강원도 21개 측정소가 위치한 지역별 특징을 조사하였다.

2. 자료의 이용 및 처리

2.1 배출량 자료

강원도 시·군별 미세먼지 배출량을 확인하기 위해 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS)의 국가 대기오염물질 배출량 통계에서 제공하는 시도별 배출량 데이터를 이용하였다.

2.2 농도 자료

강원권의 도시대기측정소는 2019년 기준으로 21개 지점이 존재한다(그림 1). 이 중 원주시에 3지점,



Fig. 1. Locations of national air pollution monitoring stations in Gangwon province (provided by Institute of Health and Environment).

춘천시에 2지점, 그리고 나머지 16개 시군에 한 지점씩 존재하여, 넓은 강원도 면적에 비해 다소 적은 숫자의 측정소가 분포되어 있다. 춘천과 원주, 강릉 측정소에서는 2015년부터 $PM_{2.5}$ 를 측정하였고, 동해시와 태백시에는 2016년부터 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 를 측정하였다. 2018년에는 평창군과 원주시 문막읍에 측정소가 추가되었으며, 2019년에 비로소 총 21개 지점의 측정소에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 측정이 시작되었다(표 1). 따라서 강원도 내의 공간분포특성은 2019년에 측정된 자료만을 이용하여 나타내었다. 또한 2019년에는 원주의 명륜동 측정소에서 반곡동 측정소로 변경되었으며, 두 측정소 사이의 거리는 약 4 km이다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 자료는 에어코리아에서 제공하는 최종확정자료를 이용하였고 별도의 검증절차를 거치지 않았다. 각 측정소에서 2015년부터 2019년까지 측정된 시간별 자료를 사용하여 일변화, 월변화 및 계절변화를 파악하였다. 일변화는 시간별 측정자료를 평균하여 나타내었으며, 월변화 또한 해당 월에 측정된 시간별 자료를 평균하여 사용하였다. 계절변화는 봄(3, 4, 5월), 여름(6, 7, 8월), 가을(9, 10, 11월), 겨울(12, 1, 2월)로 분류하여 해당기간 동안의 시간별

농도를 평균하여 사용하였다. 일변화, 월변화, 계절변화, 연평균 분포는 측정소별로 2015년부터 또는 측정이 시작된 시기부터의 자료를 사용하였다(표 1). 통계분석은 SPSS (version 23) 프로그램을 사용하였으며, 자료의 사이즈가 충분히 크기 때문에 평균들의 분포는 정규분포를 따른다는 중심극한정리를 사용하여 모수검정(parametric test)을 실시하였다.

강원도는 태백산맥을 경계로 크게 영서와 영동으로 나뉘며 두 지역의 기상 특성과 배출원 특성이 뚜렷이 다르게 나타난다. 본 논문에서는 강원권을 크게 4구역, 영서북부, 영서남부, 영동북부, 영동남부로 구분하여 미세먼지 농도특성을 조사하였다(그림 1).

3. 결과 및 고찰

3.1 공간분포특성

강원지역 미세먼지의 공간분포를 파악하기 위해, 2019년의 21개 지점의 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 연평균 농도를 파악하였다(표 2). 2019년 21개 모든 지점에서 $PM_{2.5}$ 의 연평균 기준인 $15 \mu g/m^3$ 를 초과하는 것으로 나타

Table 1. Locations of the monitoring sites and measurement period of the PM_{2.5} and PM₁₀ data obtained at each site.

	Site location	Measurement period	
		PM ₁₀	PM _{2.5}
Northwest region	Junagang-ro, Chuncheon	2015.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Seoksa, Chuncheon	2015.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Hongcheon	2019.02.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Cheolwon	2019.01.01.~2019.12.31.	2019.01.03.~2019.12.31.
	Hwacheon	2019.02.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Yanggu	2019.01.15.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Inje	2019.04.10.~2019.12.31.	2019.04.11.~2019.12.31.
Southwest region	Jungang-dong, Wonju	2015.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Bangok-dong, Wonju	2015.01.01.~2019.12.31.	2016.01.01.~2019.12.31.
	Munmak, Wonju	2018.10.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Hoengseong	2018.12.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Youngwol	2019.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Pyungchanng	2018.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Jungsun	2019.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
Northeast region	Sokcho	2019.01.15.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Goseung	2018.12.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Yangyang	2019.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
Southeast region	Gangneung	2015.01.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Donoghae	2015.01.01.~2019.12.31.	2016.01.01.~2019.12.31.
	Taebaek	2019.02.01.~2019.12.31.	Same as PM ₁₀
	Samcheok	2015.01.01.~2019.12.31.	2016.01.01.~2019.12.31.

난 반면, PM₁₀의 연평균 기준인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 지점은 없는 것으로 나타났다. 2018년의 개정 전 PM_{2.5}의 연평균 기준인 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 지점도 원주의 3지점과 횡성군, 영월군을 포함한 총 5지점으로 나타났다. 2019년의 연평균 농도가 가장 높은 권역은 영서남부지역으로, PM₁₀과 PM_{2.5}의 평균은 각각 41.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 24.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 영서남부지역에서 PM_{2.5}의 산술평균 농도가 가장 높은 지점은 원주시 반곡동지점으로 나타났으나, 기하평균의 경우 원주시 중앙동과 유사하게 나타나 원주시 반곡동에서는 고농도가 상대적으로 빈번하게 발생한다는 것을 알 수 있다. 원주시에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 배출량이 가장 높은 산업단지가 밀집해 있는 문막읍의 경우 오히려 다른 원주시 측정소에 비해 낮은 농도의 PM_{2.5}와 PM₁₀이 나타나 원주시 미세먼지 농도의 공간적 분포는 지역 배출원의 영향이 크지 않거나 지형 또는 기상 영향이 중요할 수 있음을 보여준다.

영서남부지역 다음으로 높은 농도를 나타내는 권역은 영서북부지역으로 춘천시와 홍천군, 그리고 철원군이 상대적으로 고농도를 나타내었다(표 2). 춘천시의 경우 PM_{2.5}의 농도는 중앙로 측정소가 높게 나타나는 반면 PM₁₀의 농도는 두 지점이 유사하게 나타났다. 영동남부권역에서는 PM_{2.5}의 경우 태백시가 가장 높은 농도를 나타냈으며 PM₁₀의 경우에는 태백시와 강릉시가 유사한 값을 나타냈다. 영동북부는 강원권에서 가장 미세먼지 농도가 낮은 권역으로 속초시, 고성군, 양양군이 유사한 농도를 나타냈다.

강원도의 21개 지점의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도는 ANOVA (analysis of variance) 검증결과 유의하게 다른 것으로 나타났는데(p-value < 0.001), 가까운 지점 간에도 유의한 차이가 존재하였다. 영서북부권역의 춘천 중앙로와 춘천 석사동 측정소 사이의 거리는 약 3.5 km 정도에 불과하나 중앙로의 PM_{2.5}는 석사동 측정소에 비해 통계적으로 유의하게 높은 반면(p-val-

Table 2. Summarized statistics of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at 21 monitoring sites in Gangwon Province in 2019

Site location		PM ₁₀ (μg/m ³)		PM _{2.5} (μg/m ³)	
		Arithmetic mean	Geometric mean	Arithmetic mean	Geometric mean
Northwest region	Junagang-ro, Chuncheon	42.7 ± 24.6	36.8 ± 1.75	22.7 ± 16.4	18.0 ± 2.03
	Seoksa, Chuncheon	43.4 ± 26.3	36.7 ± 1.82	20.8 ± 13.7	16.6 ± 2.07
	Hongcheon	36.1 ± 22.3	29.7 ± 1.94	22.0 ± 16.3	16.8 ± 2.23
	Cheolwon	39.0 ± 24.8	32.4 ± 1.88	21.7 ± 18.8	15.4 ± 2.48
	Hwacheon	32.1 ± 17.7	28.6 ± 1.60	17.0 ± 11.1	13.9 ± 1.96
	Yanggu	35.9 ± 19.5	31.5 ± 1.67	19.5 ± 12.8	16.0 ± 1.93
	Inje	27.0 ± 4.3	23.6 ± 2.75	15.6 ± 8.99	13.2 ± 1.83
	Average	37.1 ± 22.6	31.4 ± 1.80	20.1 ± 14.7	15.7 ± 2.10
Southwest region	Jungang-dong, Wonju	48.7 ± 27.0	42.2 ± 1.73	27.3 ± 17.5	22.8 ± 1.84
	Bangok-dong, Wonju	46.4 ± 26.6	39.4 ± 1.82	29.1 ± 21.4	22.5 ± 2.15
	Munmak, Wonju	36.7 ± 20.7	31.8 ± 1.74	23.0 ± 15.5	18.8 ± 1.95
	Hoengseong	42.4 ± 26.3	35.8 ± 1.80	25.4 ± 18.4	20.5 ± 1.96
	Youngwol	40.5 ± 21.6	35.8 ± 1.65	25.4 ± 18.3	20.1 ± 2.05
	Pyungchanng	41.6 ± 20.2	37.5 ± 1.57	24.1 ± 15.8	19.9 ± 1.87
	Jungsun	34.9 ± 17.8	31.0 ± 1.64	20.2 ± 13.2	16.7 ± 1.91
	Average	41.6 ± 23.6	36.0 ± 1.72	24.9 ± 17.5	20.1 ± 1.97
Northeast region	Sokcho	36.1 ± 19.0	32.0 ± 1.63	16.8 ± 12.4	13.0 ± 2.14
	Goseung	32.6 ± 18.3	28.5 ± 1.69	16.6 ± 10.9	13.7 ± 1.89
	Yangyang	30.7 ± 17.5	26.6 ± 1.71	15.3 ± 9.57	13.0 ± 1.79
	Average	33.1 ± 18.4	28.9 ± 1.68	16.2 ± 11.0	13.2 ± 1.94
Southeast region	Gangneung	35.6 ± 17.3	32.3 ± 1.56	18.1 ± 11.7	15.2 ± 1.82
	Donoghae	32.8 ± 17.3	29.2 ± 1.62	18.6 ± 10.3	16.3 ± 1.67
	Taebaek	35.3 ± 17.1	31.8 ± 1.59	20.5 ± 10.5	18.4 ± 1.59
	Samcheok	31.7 ± 16.5	28.3 ± 1.59	17.1 ± 10.8	14.4 ± 1.82
	Average	33.8 ± 17.1	30.3 ± 1.60	18.6 ± 10.9	15.9 ± 1.74

ue < 0.001, Tukey HSD (Honestly Significant Difference)) PM₁₀ 농도에 대한 통계적 차이는 없었다 (p-value = 0.349). 영서남부권역에서 가장 농도가 높은 원주의 세 지점의 경우에도 PM_{2.5}의 농도 차이는 통계적으로 유의했으며, PM₁₀의 경우에도 문막읍의 농도가 다른 두 지점에 비해 유의하게 낮은 것으로 나타났다 (p-value < 0.01). 이러한 결과는 서로 가깝게 위치한 측정소의 경우에도 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인들이 서로 다르거나 각 요인의 정량적 영향성이 다르다는 것을 의미한다.

강원도의 모든 시·군·구에서 측정이 시작된 2019

년의 PM_{2.5} 농도 (단, 인제군의 경우 2019년 4월 1일부터 측정이 시작되었음)의 공간분포를 파악한 결과, 뚜렷한 서고동저 현상이 나타났다 (그림 2). 영서권역으로 설정된 지역 중에는 인제군의 PM_{2.5} 농도가 낮게 나타났을 뿐, 모든 지역에서 영동지역에 비해 높은 농도를 나타냈다. 특히 영서 남부지역의 원주시, 횡성군, 영월군의 농도가 가장 높은 수준으로 나타났으며, 영서북부의 춘천시와 홍천군도 상당히 높은 PM_{2.5}의 농도가 나타났다. 반면, 동일한 영서북부권역에 속해있는 철원군, 화천군, 양구군, 인제군의 경우에는 상대적으로 낮은 PM_{2.5}의 농도가 나타났다. 영동권역의 경우 전반적으로 영동북부권역의 PM_{2.5}

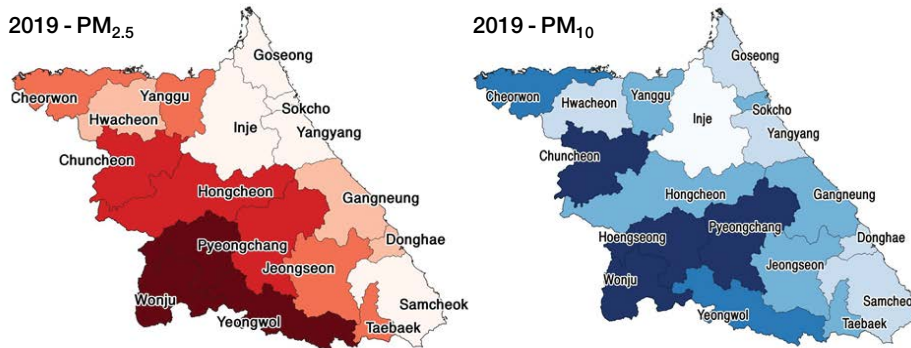


Fig. 2. Spatial distributions of PM_{2.5} and PM₁₀ in Gangwon Province in 2019.

농도는 낮게 나타났고 영동남부권역에서는 강릉시의 농도가 가장 높게 나타나 주의가 필요하다고 판단된다(그림 2).

강원도의 PM₁₀의 공간분포는 PM_{2.5}와는 다소 다르게 나타났다. PM_{2.5}와 마찬가지로 서고동저 현상이 나타났지만 세부적인 시·군 지역에서 차이가 보인다. 2019년에 영서남부권역의 원주시와 횡성군은 지속적으로 고농도를 나타내었고, 영서북부지역의 춘천시도 고농도를 나타냈다(그림 2). 반면 영서북부지역 중 고농도 PM_{2.5}를 나타낸 홍천군의 경우에는 상대적으로 낮은 PM₁₀ 농도를 나타내었다. 다소 다르게 나타난 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도의 공간분포는 초미세입자(PM_{2.5})와 이보다 큰 미세입자(PM_{2.5-10})의 주요 배출원이 동일하지 않고, 농도에 영향을 주는 요인들(e.g. 2차입자 생성요인)의 정량적 기여도도 다르기 때문으로 판단된다.

PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도의 CAPSS 배출량 분포(그림 3)를 비교한 결과, 대체적으로 강원도 남부 지역의 배출량이 높게 나타났다. 2015년의 CAPSS 자료를 살펴보면 대규모 시멘트 공장이 위치한 강릉, 동해, 삼척, 영월에서 가장 높은 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 배출량을 나타냈다(그림 3). 그러나 2016년부터 시멘트 공장에서 비민수용무연탄을 사용하지 않으면서 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 배출량이 대폭 감소하였고, 2017년에는 원주, 횡성, 영월, 강릉의 연간 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 배출량이 가장 높은 그룹을 형성하였다(그림 3). 2017년 CAPSS 자

료에서 가장 높은 배출량(PM₁₀과 PM_{2.5}의 연간 배출량은 각각 1,167 metric ton과 508 metric ton)을 보이는 원주시는 PM₁₀ 배출량의 약 24%, 그리고 PM_{2.5} 배출량의 약 49%가 생물성연소에 기원하며 이 중 숲가마로부터의 배출이 가장 큰 것으로 나타났다. 농도와 배출량의 분포를 비교해보면, 배출량은 강원도 남부가 대체적으로 높은 반면(그림 3), 대기 중 농도는 영서지역이 높은 것으로 나타났다(그림 2). 특히 영서북부 지역의 춘천, 철원, 양구 등은 CAPSS에 보고된 지역(국지) 배출량에 비해 높은 대기 중 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도를 나타냈다. 향후 강원도 영서북부지역의 미세먼지 고농도 원인을 파악해볼 필요성이 존재한다.

2019년에 측정된 총 21개 측정소에서의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 연평균 농도를 plot하여 각 도시별로 미세입자 특성을 파악해보았다(그림 4). PM_{2.5} 농도와 PM₁₀ 농도 사이의 결정계수(r^2)는 0.79로 좋은 상관성이 나타나, PM_{2.5}의 농도가 높은 지역은 대체적으로 PM₁₀의 농도도 높다는 것을 알 수 있다. PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도가 가장 높은 두 지점인 원주시 중앙동과 원주시 반곡동을 살펴보면, 중앙동의 경우 상대적으로 PM_{2.5}에 비해 PM₁₀의 농도가 높고 반곡동의 경우 그 반대로 나타난다(그림 4). 그림 4에서 PM_{2.5}에 대한 PM₁₀의 기울기 선 이하(기울기 선 오른쪽)에 있는 지역은 다른 지역에 비해 PM₁₀에 비해 상대적으로 PM_{2.5}의 농도가 더 높게 나타나는 지역이며, 기울기 선 이상

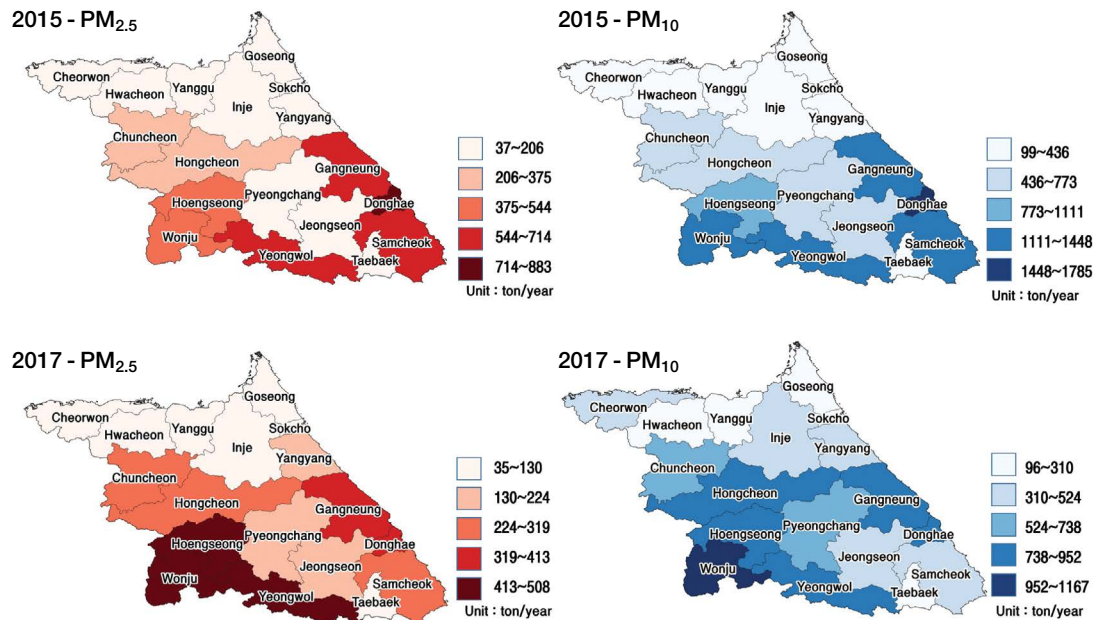


Fig. 3. Maps of PM_{2.5} and PM₁₀ emission by region from CAPSS inventory in 2015 and 2017.

(기울기 선 왼쪽)에 있는 지역은 다른 지역과 비교하여 PM_{2.5}에 비해 PM₁₀의 농도가 상대적으로 더 높게 나타나는 지역이다. 강원도의 다른 지역에 비해 춘천시의 두 측정소는 PM_{2.5}의 농도수준에 비해 PM₁₀의 농도가 더 높게 나타나는 지역이며, 이는 사이즈가 2.5~10 μm인 다소 큰 입자의 배출이 더 높다는 것을 나타낸다. 반면, 미세먼지 농도가 대체적으로 높게 나타나는 측정소 중 원주 문막읍과 홍천군, 영월군의 경우에는 PM₁₀에 비해 PM_{2.5}가 상대적으로 더 높게 나타나는 지역 중 하나이며, 이는 이 지역 미세먼지 농도에 영향을 미치는 배출 중 자연 배출 또는 기계적 마모(mechanical disintegration) 등의 물리적 배출원에 비해 연소 배출 또는 2차 에어로졸의 생성이 더 중요하다는 것을 시사한다(Aldabe *et al.*, 2011; Pandolfi *et al.*, 2011; Myles *et al.*, 2010, 2009).

강원도에 존재하는 총 21개 측정소에서 측정된 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도 사이의 피어슨 상관계수는 모든 지역에서 높게 나타났으나, 지역별로 0.75에서 0.94로 다양한 값을 보였다(그림 5). 동해에 인접해있는

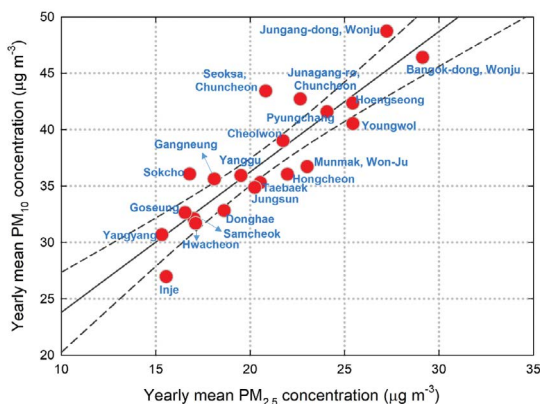


Fig. 4. Correlation plot between yearly averaged PM_{2.5} and yearly averaged PM₁₀ observed at 21 monitoring sites in 2019.

지역인 강릉, 동해, 삼척, 속초, 양양은 모두 피어슨 상관관계수가 상대적으로 낮게 나타나, 해양 배출원과 인위적 배출원이 공존하여 각각 PM_{2.5-10}와 PM_{2.5}에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 반면, 영서남부 권역에 속한 횡성군과 원주 문막, 영월 등은 모두 높

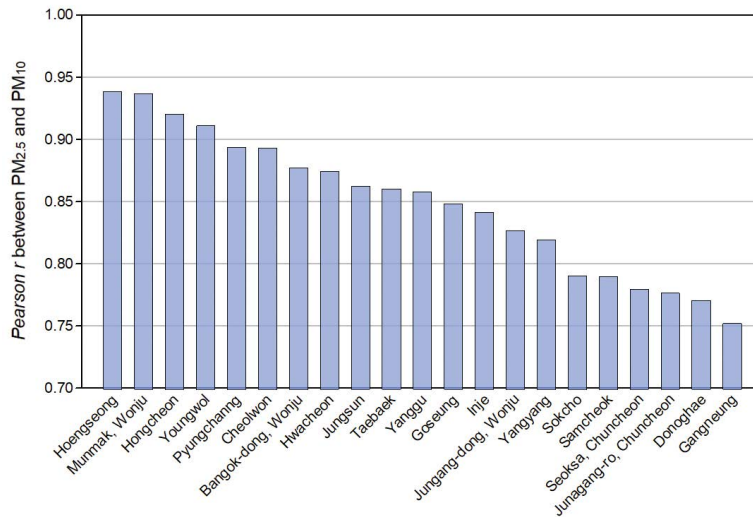


Fig. 5. Pearson correlation coefficient between hourly PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at 21 locations.

은 상관계수가 나타나(그림 5) PM_{2.5}와 PM_{2.5-10}의 농도에 영향을 미치는 배출원이 동일한 배출원일 가능성이 높다. 영서북부권역에 속한 춘천시의 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀ 사이의 상관계수가 타 지역에 비해 상당히 낮게 나타나(그림 5), PM_{2.5}와 PM_{2.5-10}의 배출원 또는 생성원이 상이할 것으로 판단된다. 춘천은 바다에 인접한 도시는 아니지만 호수가 많이 존재하여 안개가 빈번히 발생하고 상대습도가 높은 특징을 지닌다. 춘천에서 진행된 선행 연구 결과, 습도가 증가할수록 PM_{2.5}의 농도가 증가할 뿐만 아니라 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율도 동시에 증가하는 것으로 나타나(Cho *et al.*, 2016) 불균질(heterogeneous) 2차 생성반응이 활발한 것으로 판단되고, 이러한 이유로 PM_{2.5}의 농도와 PM₁₀의 농도 사이의 상관계수가 상대적으로 낮은 것으로 추정된다(그림 5).

강원도의 21개 도시대기측정소에서의 PM_{2.5} 농도가 서로 상관성이 있는지 파악한 결과, 모든 측정소의 PM_{2.5} 사이의 피어슨 상관계수는 0.6 이상으로 서로 유의한 상관성이 있는 것으로 나타났다(그림 6). 같은 영서지역 내에서는 영서남부와 영서북부에 상관없이 0.9 이상의 높은 상관성을 나타내었고, 같은 영동지역 내에서도 마찬가지로 북부와 남부 권역에

상관없이 대체적으로 높은 상관성을 나타냈다. 그러나 영서지역과 영동지역 간 상관성은 상대적으로 낮게 나타났다. 이 결과는 영서지역의 PM_{2.5} 농도는 중국 및 우리나라 서쪽 지역으로부터 큰 영향을 받는다는 것을 시사하는 반면, 영동지역은 영서지역에 비해 중국 및 수도권을 포함한 우리나라 서쪽 지역으로부터의 중장거리 이동의 영향이 낮을 수 있다는 사실을 추론할 수 있다(Son *et al.*, 2018). 북부와 남부 권역의 서로 간의 상관계수도 같은 권역에서의 상관계수에 비해 다소 낮은 것으로 보여, 강원도는 네 권역별로 미세먼지 농도 대책을 수립하는 것이 타당하다고 판단된다.

3.2 연평균 추세

강원도 권역의 미세먼지 농도의 연도별 추세를 파악하기 위해 2015년 또는 2016년부터 측정된 춘천, 원주, 강릉, 삼척시 측정소의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 시간별 농도를 이용하여 연도별 농도 분포를 그려보았다(그림 7). PM_{2.5}의 경우 대부분의 측정소에서 연평균, 중앙값, 1사분위와 3사분위, 그리고 상위 5% 농도가 모두 감소 추세를 보이고 있으나, 춘천 석사동의 경우 2019년의 평균 농도(20.8 µg/m³)와 중앙값(18.0 µg/

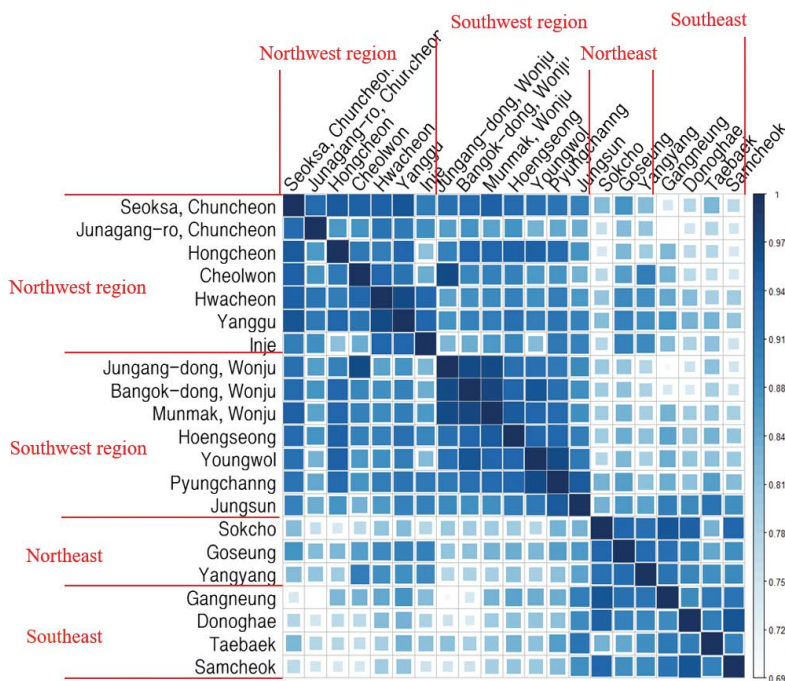


Fig. 6. Pearson correlation coefficient between $PM_{2.5}$ concentrations at two stations.

m^3)이 2018년의 평균 농도 ($19.7 \mu g/m^3$)와 중앙값 ($17.0 \mu g/m^3$)에 비해 약간 증가한 것으로 나타났다. 또한 강릉의 경우 2015년에 낮은 농도 ($20.0 \mu g/m^3$)를 보이다가 2016년과 2017년에 각각 $27.2 \mu g/m^3$ 와 $24.7 \mu g/m^3$ 로 증가하였고 2018년에 다시 감소하는 경향을 보였다(그림 7).

일별 $PM_{2.5}$ 농도가 24시간 대기환경기준 ($35 \mu g/m^3$)을 초과하는 일수의 백분율도 연평균 농도 추세와 유사하게 낮아지는 것으로 나타났으나, 강릉시의 경우 2016년 이래로 대체적으로 감소하는 추세를 나타냈다. $PM_{2.5}$ 대기환경기준을 초과하는 일수의 백분율은 춘천의 경우 약 10~30%, 원주의 경우 20~40%, 강릉의 경우 5~20%, 그리고 삼척의 경우 모든 연도에서 12% 미만으로 나타났다(그림 7). 2019년의 경우 강릉과 삼척에서는 약 6~7%의 측정일수만이 대기환경기준을 초과한 반면, 춘천에서는 약 15%, 원주에서는 약 22~28%가 초과하는 것으로 나타나, 고농도 사례도 영서지역이 영동지역에 비해 더 빈번하게 발생

하는 것을 알 수 있다.

PM_{10} 의 연평균 농도 역시 각 지점에서 전반적으로 감소하는 추세를 보였다. 그러나 영서지역인 춘천시와 원주시의 경우 2018년에 비해 2019년의 평균 및 중앙값이 모두 증가한 것으로 나타나 $PM_{2.5}$ 와는 다소 다른 양상을 나타냈다(그림 7). 강릉시의 경우 2015년 $PM_{2.5}$ 의 연평균 농도는 다른 해에 비해 상대적으로 낮은 값을 보였으나 PM_{10} 의 연평균 농도는 가장 높은 값을 나타내었다. 또한 $PM_{2.5}$ 의 경우 24시간 대기환경기준을 초과하는 일수의 비율이 해마다 감소하는 추세를 나타낸 반면, PM_{10} 의 기준 초과일수는 일관된 추세를 보이지 않았다. 영서지역인 춘천과 원주에서 관측된 PM_{10} 의 환경기준 초과일수는 유사한 연도별 경향, 즉 2015년 > 2017년 $\approx$ 2019년 > 2016년 > 2018년의 순서를 보였다. 즉, 모든 지점에서 PM_{10} 의 연평균 농도 추세는 환경기준 초과일수의 비율 추세와 다르게 나타났으며, 이는 연평균 농도 경향이 PM_{10} 의 고농도 발생 경향을 대표할 수 없다

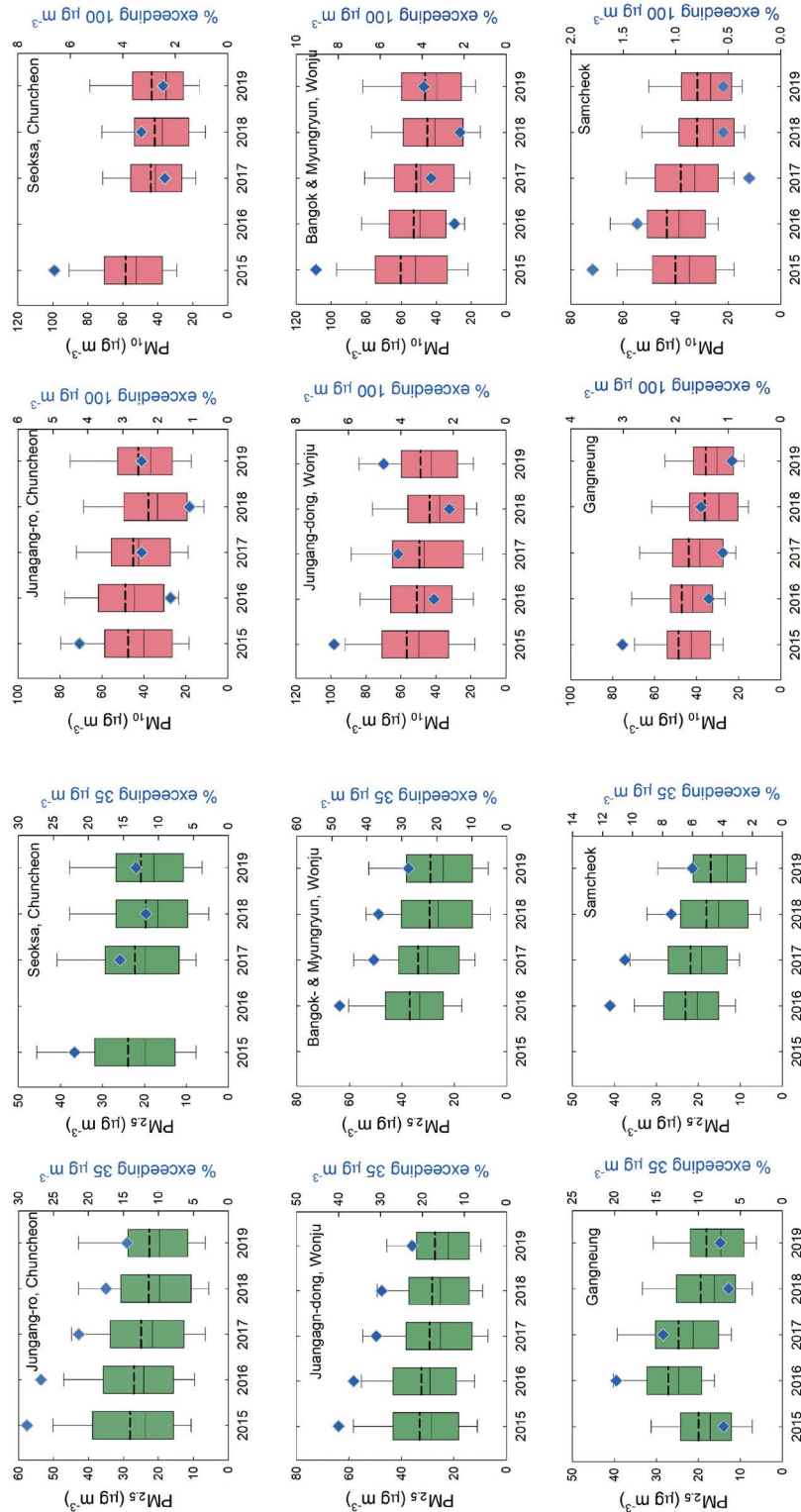


Fig. 7. Box-plots of yearly PM_{2.5} (green) and PM₁₀ (red) concentration at each station. Black dashed lines indicate the arithmetic mean, and blue diamond symbols indicate the percentage exceeding the 24 h national ambient air quality standard.

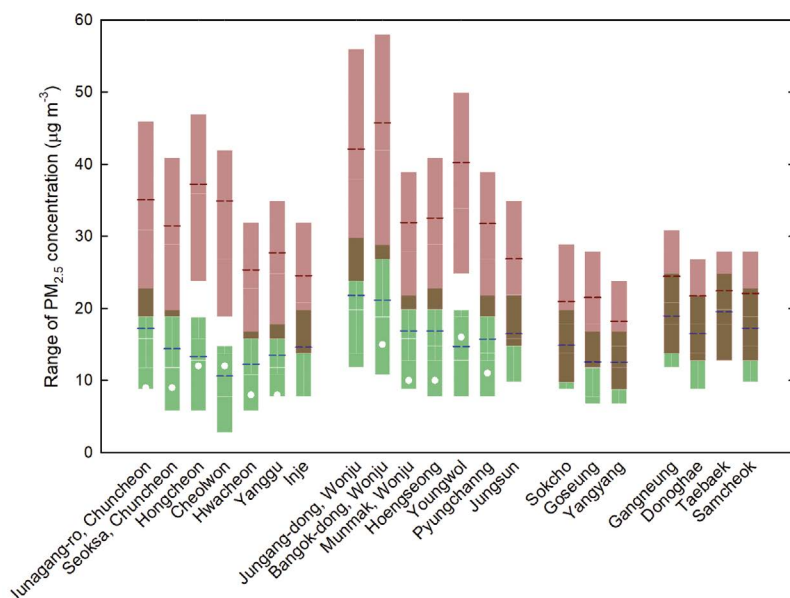


Fig. 8. Range of $PM_{2.5}$ concentration in summer (green bar) and winter (red bar) at each station. Hourly data in Table 1 were used.

는 것을 나타낸다.

3.3 계절별 및 월별 추세

우리나라는 대부분의 지역에서 겨울철 $PM_{2.5}$ 고농도와 여름철 $PM_{2.5}$ 저농도를 보인다. 강원도의 21개 지점에서는 대체적으로 여름철과 가을철에 낮은 $PM_{2.5}$ 의 농도를 보이고 봄철과 겨울철에 높은 $PM_{2.5}$ 농도를 보였다. 그러나 지점별로 최저농도가 나타나는 계절과 최고농도가 나타나는 계절은 다르게 나타났는데, 영동지역에 위치한 속초, 양양, 강릉, 동해, 태백, 삼척의 경우 봄철 최고농도 및 가을철 최저농도가 일관성있게 나타난 반면, 영서지역에 위치한 모든 지점에서는 겨울철 최고농도 및 여름철 최저농도가 나타났다. 영서지역에서 계절변이가 가장 크게 나타난 지점은 철원군으로 겨울철 평균 $PM_{2.5}$ 농도가 여름철에 비해 3.3배 높았다. 각 측정소에서의 겨울철 $PM_{2.5}$ 농도와 여름철 $PM_{2.5}$ 농도 분포의 차이를 살펴보면, 영서지역의 모든 측정소는 겨울철과 여름철의 농도 분포 차이가 뚜렷하게 나고, 특히 홍천, 철원, 영

월의 경우에 가장 큰 차이를 나타낸다(그림 8 : 표 1의 시간별 자료를 사용함). 반면 영동지역의 경우 여름철과 겨울철의 차이가 상대적으로 작게 나타내며, 특히 영동남부권역의 여름철-겨울철 농도 차이가 가장 작게 나타났다(그림 8).

$PM_{2.5}$ 의 월별농도 역시 각 권역 내에서는 유사한 경향성을 보였다. 영서지역에 위치한 원주시의 $PM_{2.5}$ 농도(원주시 세 측정소의 평균값을 사용함)는 여름철에 가장 낮은 농도를 보이다가 10월부터 증가하여 이듬해 3월까지 높은 농도를 보이고 다시 4월부터 감소하여 7월~9월까지 가장 낮은 농도를 보인다. 반면 영동지역에 위치한 강릉시의 $PM_{2.5}$ 농도는 대체적으로 8월과 9월에 가장 낮은 농도를 보이다가 가을부터 증가하여 이듬해 3월~5월까지 높은 농도를 보인다(그림 9). 따라서 두 지점으로 대표되는 영서지역과 영동지역의 $PM_{2.5}$ 농도 차이는 겨울철에 최대로 벌어지지만 5월부터 10월까지의 큰 차이를 보이지 않는다.

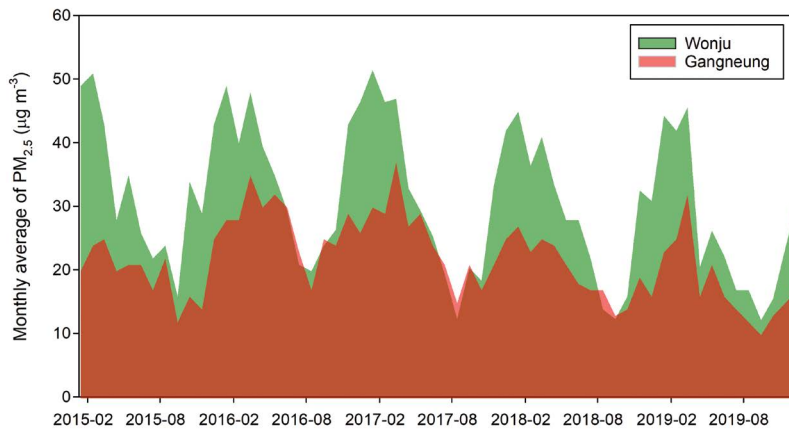


Fig. 9. Variation of monthly averaged PM_{2.5} at the Wonju and the Gangneung stations. Hourly data were used.

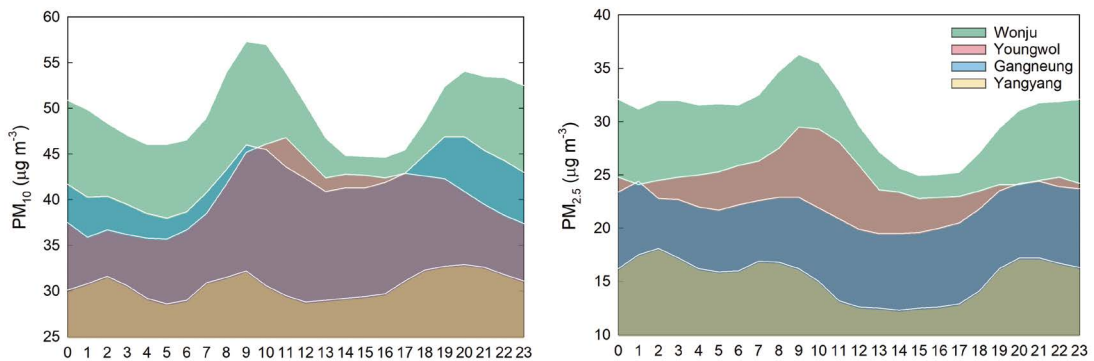


Fig. 10. Diurnal variation of PM₁₀ (left) and PM_{2.5} (right) at various stations.

3.4 일변화 특징

PM₁₀의 시간별 농도는 대체적으로 오전 10시와 오후 8시에 고농도를 나타내며 오전 5시와 약 오후 3시에 최저농도를 나타냈다(그림 10). 영서남부권역의 원주의 세 측정소와 춘천의 두 측정소, 그리고 강릉 측정소에서의 일변화는 유사하게 나타났으며, 이는 오전과 오후의 출퇴근 시간에 많아지는 차량의 영향이 크기 때문으로 판단된다. 상대적으로 농도가 낮게 나타나는 영동북부권역에 있는 양양 측정소는 3개의 peak이 나타났는데 다른 측정소에 비해 농도의 일변화가 크지 않았다(그림 10). 오전 10시와 오후 8시의 정점을 보이지 않는 측정소는 영서북부권역 중에서

는 화천군, 양구군, 영서남부권역에서는 영월군, 영동남부권역에서는 태백시로, 주로 소도시에서 독특한 시간변이를 나타내었다. 영월은 자동차 대수가 적은 반면 시멘트 공장이라는 뚜렷한 점오염원이 존재하기 때문에 오전과 저녁 출퇴근 시간대의 농도증가가 보이지 않았고 낮시간 동안에 높은 농도를 보였다(그림 10). 화천은 오전 5시 부근에 최저점을 나타내고 나머지 시간 동안은 유사한 농도를 보였으며, 인제군의 경우 오후 정점이 보이지 않았다.

PM_{2.5}의 시간별 농도를 살펴보면, 영서권역에 있는 대부분의 측정소에서는 오전 9시~10시에 가장 높은 정점을 보였다(그림 10). 또한, PM₁₀의 일변화에서

나타난 새벽시간대의 저농도가 $PM_{2.5}$ 에서는 나타나지 않았다. 영동권역의 경우 오전보다 오후 8시 이후에 더 높은 농도를 나타내는 측정소가 많았다. 특히 하계 화천군과 영서남부권역의 영월은 PM_{10} 과 마찬가지로 $PM_{2.5}$ 에서도 오전 peak만 관측할 수 있었으며, 이들 지역은 차량에 의한 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 판단된다. 인제군의 경우에는 늦은 밤과 새벽에 고농도를 나타내며 오전 4시부터 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하기 시작하여 오후 12시에 최저점을 보이고 이후로 증가하기 시작하는 경향을 보인다. 영동북부권역의 양양은 PM_{10} 과 마찬가지로 다른 측정소에 비해 농도의 일변화가 적게 나타났다(그림 10). 영동남부권역의 강릉의 $PM_{2.5}$ 의 일변화는 PM_{10} 농도와 달리 오전과 오후 출퇴근 차량의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았고, 양양과 마찬가지로 농도의 일변화가 상대적으로 뚜렷하지 않았다(그림 10).

전반적으로 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 일변화는 유사하게 나타났다. PM_{10} 이 $PM_{2.5}$ 에 비해 출퇴근시간의 자동차 영향을 더 많이 받는 것으로 보여진다. PM_{10} 은 많은 측정소에서 오후 8시 퇴근시간의 peak이 어느 정도 뚜렷하게 나타난 반면 $PM_{2.5}$ 는 최저점이 나타나는 오후 3시경 이후로 새벽까지 지속적으로 증가하는 경향이 다수 나타났다.

4. 결 론

강원도의 각 권역별 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도의 공간분포는 대체적으로 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 CAPSS 배출량 분포와는 다르게 나타났다. $PM_{2.5}$ 의 CAPSS 배출량은 영서남부에서 가장 높고, 그 다음으로 영동남부, 영서북부, 영동북부의 순서이지만, 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 농도는 영서지역이 영동지역에 비해 높게 나타났다. 대기환경기준을 초과하는 일수 역시 영서지역의 원주와 춘천이 높게 나타난 반면 영동지역의 강릉과 삼척에서는 6~7%에 불과하였다. PM_{10} 의 배출량은 영서북부와 영동남부가 유사하게 나타났지만, 대기 중

PM_{10} 의 농도는 영서북부의 농도가 영동남부에 비해 매우 높은 수준을 나타냈다. 권역별 배출량과 농도 분포의 불일치는 강원도 대기 중 미세먼지의 농도가 지역별 배출량에 크게 의존하지 않는다는 것을 시사한다. 또한 동일한 권역 내에서는 측정소 간 $PM_{2.5}$ 의 상관성이 0.9 이상으로 높게 나타났으나, 영서지역과 영동지역 간 $PM_{2.5}$ 의 상관성은 상대적으로 낮게 나타나, 두 권역의 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 주는 배출 및 생성경로가 차이가 있다는 것을 보여준다. 전반적으로 높은 농도를 나타내는 영서지역은 낮은 풍속, 긴 체류시간 등의 기상요인과 수도권을 포함한 우리나라 서쪽지역으로부터의 중거리 이동으로 인한 영향이 중요한 것으로 판단된다.

2015년부터 2019년까지의 $PM_{2.5}$ 연평균 농도와 대기환경기준 초과일수는 대부분의 측정소에서 감소하는 추세를 보였으나 강릉시의 경우 뚜렷한 추세가 나타나지 않았다. 영서지역의 $PM_{2.5}$ 의 계절별 및 월별 변이는 영동지역에 비해 더 크게 나타나, 겨울철에 두 지역의 농도 차이가 최대로 벌어지지만 5월부터 10월까지의 유의미한 차이를 보이지 않았다. 각 측정소에서의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 일변화는 서로 유사하게 나타났으나, PM_{10} 이 $PM_{2.5}$ 에 비해 출퇴근 시간의 자동차 영향을 더 많이 받는 것으로 관측되었다. 인구수와 자동차 대수가 상대적으로 많은 원주와 춘천시의 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 의 일변화는 오전 9시~10시와 오후 8시~9시에 고농도를 나타냈고 오후 3시에 최저농도를 나타냈다. 반면 영월군, 화천군 등의 소도시에서는 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 농도의 일변화가 상대적으로 크지 않았다.

감사의 글

이 연구는 강원대학교병원 환경보건센터와 한국연구재단 (Grant No. 2017K1A3A1A12073373 및 2020R1A2C2013445)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

References

- Aldabe, J., Elustondo, D., Santamaría, C., Lasheras, E., Pandolfi, M., Alastuey, A., Santamaria, J.M. (2011) Chemical characterisation and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ at rural, urban and traffic sites in navarra (north of Spain), *Atmospheric Research*, 102(1), 191-205. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.07.003>
- Bae, M.-S., Jung, C.-H., Ghim, Y.-S., Kim, K.-H. (2013) A Proposal for the Upgrade of the Current Operating System of the Seoul's Atmospheric Monitoring Network Based on Statistical Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.447>
- Cho, S.-H., Kim, H.-W., Han, Y.-J. Kim, W.-J. (2016) Characteristics of Fine Particles Measured in Two Different Functional Areas and Identification of Factors Enhancing Their Concentrations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32, 100-113, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.100>
- Ghim, Y.-S., Choi, Y.-J., Park, J.-S., Kim, C.-H. (2014) An Assessment Study for the Urban Air Monitoring Network in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30, 504-509, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.5.504>
- Ghim, Y.-S., Kim, C.-H. (2013) Regional Trends in Short-Term High Concentrations of Criteria Pollutants from National Air Monitoring Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/10.5572/KOSAE.2013.29.5.545>
- Han, Y.-J., Kim, H.-W., Cho, S.-H., Kim, P.-R., Kim, W.-J. (2015) Metallic elements in PM_{2.5} in different functional areas of Korea: Concentrations and source identification, *Atmospheric Research*, 153, 416. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.002>
- Ju, J.-H., Hwang, I.-J. (2011) A Study for Spatial Distribution of Principal Pollutants in Daegu Area Using Air Pollution Monitoring Network Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/10.5572/KOSAE.2011.27.5.545>
- Kim, K.-H., Kabir, E., Kabir, S. (2015) A review on the human health impact of airborne particulate matter, *Environment International*, 74, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Kim, Y.-M. and Kim, J.Y., Lee, S.-B., Moon, K.-C., Bae, G.-N. (2015) Review on the Recent PM_{2.5} Studies in China, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31, 411-429, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.5.411>
- Myles, S., Chia, J., Hurwitz, B., Simon, C., Zhong, G.Y., Buckler, E., Ware, D. (2010) Rapid genomic characterization of the genus vitis, *PLoS One*, 5(1), e8219. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008219>
- Myles, S., Peiffer, J., Brown, P.J., Ersoz, E.S., Zhang, Z., Costich, D.E., Buckler, E.S. (2009) Association mapping: Critical considerations shift from genotyping to experimental design, *The Plant Cell*, 21(8), 2194-2202. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.068437>
- Myong, J.-P. (2016) Health Effects of Particulate Matter. *Korean Journal of Medicine*, 91(2), 106-113, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.3904/kjm.2016.91.2.106>
- Pandolfi, J.M., Connolly, S.R., Marshall, D.J., Cohen, A.L. (2011) Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification, *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 333(6041), 418-422. <https://doi.org/10.1126/science.1204794>
- Park, C.-H., Oh, S.-H., Song, M.-K., Choi, W.-S., Bae, M.-S. (2020) Reflection of Mitigation Strategy for Air Pollution based on Clean Air Policy Support System- Concentration Analysis from the Atmospheric Monitoring Network in the Seoul and Gwangju Areas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36, 228-239, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/10.5572/KOSAE.2020.36.2.228>
- Park, S.-A., Shin, H.-J. (2017) Analysis of the Factors Influencing PM_{2.5} in Korea : Focusing on Seasonal Factors, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25, 227, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.1.227>
- Son, H.-Y., Kim, C.-H. (2009) Interpreting the Spectral Characteristics of Measured Particle Concentrations in Busan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25, 133-140, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2009.25.2.133>
- Son, J.-S., Yoo, C., Park, J.-H., Lee, S.-H., Park, Y.-S., Kang, S.-Y., Lee, S.-B., Kim, J.-S. (2018) Analysis and Interpretation of the Causes of High particulate matter pollution in Gangwon Province, *National Institute of Environmental Research*, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.23000/TRKO201900003799>

Yu, G.-H., Park, S.-S., Ghim, Y.S., Shin, H.-J., Lim, C.-S., Ban, S.-J., Yu, J.-A., Kang, H.-J., Seo, Y.-K., Kang, K.-S., Jo, M.-R., Jung, S.-A., Lee, M.-H., Hwang, T.-K., Kang, B.-C., Kim, H.-S. (2018) Difference in Chemical Composition of $PM_{2.5}$ and Investigation of its Causing Factors between 2013 and 2015 in Air Pollution Intensive Monitoring Stations, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34, 16-37, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/10.5572/KOSAE.2018.34.1.016>

Authors Information

차승환 (강원대학교 환경학과 석사과정)

한영지 (강원대학교 환경융합학부 에코환경과학전공 교수)

배귀남 (한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단 단장)