

상업지역의 초미세먼지(PM_{2.5}) 발생특성 연구

Characteristics of PM_{2.5} Emission and Distribution in a Highly Commercialized Area in Seoul, Korea

서영호 · 구명성 · 최진원 · 김경민 · 김상미 · 설경화
조효재 · 김수진 · 김기현*
한양대학교 건설환경공학과

(2014년 12월 15일 접수, 2015년 2월 12일 수정, 2015년 3월 9일 채택)

Young-Ho Seo, Myeong-Seong Ku, Jin-Won Choi, Kyeong-Min Kim,
Sang-Mi Kim, Kyung-Hwa Sul, Hyo-Jae Jo, Su-jin Kim and Ki-Hyun Kim*
Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received 15 December 2014, revised 12 February 2015, accepted 9 March 2015)

Abstract

The pollution of particulate matter (PM) is considered one of the hot socioenvironmental issues at present time. In this study, we investigated the distribution of fine particulate matter (PM_{2.5}) in Wangsimni commercial areas in Seoul, Korea to learn more about its environmental behavior in an urban area. Our analysis of PM_{2.5} was made to distinguish the PM_{2.5} pollution levels between three different types of site characteristics: (1) densely populated area, (2) thinly populated area, and (3) traffic roadside. Moreover, to assess the temporal trends in our study, the concentration levels of PM_{2.5} were also compared between weekdays and weekends and between early in the afternoon and evening. The average concentration of PM_{2.5} from densely and thinly populated areas were measured as 36.0 ± 13.1 and $32.3 \pm 11.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. If the results are compared between different time bands, there were apparent differences between weekdays ($29.6 \pm 10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and weekends ($36.9 \pm 12.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Such difference was also evident between noon ($27.8 \pm 5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and evening ($38.3 \pm 13.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). According to our research, concentration of PM_{2.5} in the study area was affected more sensitively by time zone rather than the population density. The measurement data was also analyzed by drawing concentration map of PM_{2.5} in the Wangsimni commercial areas based on data contouring method.

Key words : PM_{2.5}, Wangsimni, Commercial areas, Spatial-temporal variation, Kriging method, Contouring

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-2220-2325, E-mail : kkim61@hanyang.ac.kr

1. 서 론

기존의 역학연구조사 결과 미세먼지는 천식을 비롯한 호흡기 질환, 뇌졸중 등으로 인한 유병률 및 민감집단의 사망률증가 및 발암의 원인으로도 지목받고 있다(Han, 2014; Park, 2008).

직경 $10\ \mu\text{m}$ 이하인 입자는 인체 유입 시 코의 섬모나 기도 등을 통과하여 폐에 깊숙이 침투할 수 있다. 따라서 미세먼지는 그 자체뿐만 아니라 금속, 유기물, 산, 이산화질소, 기타 오염물질 등과 결합하여 2차 오염물질로 변환하기 쉽다. 따라서 PM의 존재는 인체에 다양한 형태로 영향을 미칠 수 있다(Hwang *et al.*, 2014). 특히, 직경 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 영역을 대표하는 $\text{PM}_{2.5}$ 는 인체 내 기관지 및 폐 깊숙한 곳까지 침투하기 쉬워, 기관지, 폐 등에 붙어 각종 질환을 유발할 수 있다. 또한, 장기간 미세먼지에 노출시 면역력의 급격한 저하로 감기, 천식, 기관지염 등의 호흡기 질환은 물론 심혈관 질환, 피부질환, 안구질환 등 각종 질병을 감염시킬 수 있다(National Institute of Environmental Research, 2006).

수도권 지역의 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)에 대한 배출원 조사에 의하면, 전체 배출량 중 고기집과 숯가마 찜질방이 전체의 22%를 차지하는 것으로 나타났다(Ministry of Environment, 2010). 이는 자동차 배출량의 절반에 해당하는 것으로 이들 배출원의 중요성을 간접적으로 대변한다. 현재 국내에서는 고기집과 숯가마 찜질방 등과 같은 소규모 배출원들에 대한 미세먼지의 배출을 규제하기 위한 관리규정이나 대책이 수립되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 왕십리 상업지역의 식당가를 중심으로 초미세먼지의 분포특성을 관측하였다. 특히, 식당가의 밀집도 및 시간대(요일 및 시간 등)의 비교 기준을 설정하여 상업지역에서 발생하는 초미세먼지의 발생경향을 파악하고자 하였다. 이를 통해, 상업지역에서의 초미세먼지의 배출특성을 진단해 보고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 측정지점 선정 및 측정방법

왕십리 상업지역의 생활본진 발생특성을 연구하기

위하여, 다음과 같이 조사대상을 선정하였다. 조사대상은 미세먼지의 농도를 비교·분석할 수 있게 배출원 밀집지역(A), 비밀집지역(B), 그리고 이들에 대한 대조군으로 도로변지역(C)과 같이 크게 3구역으로 나누었다. 그리고 날씨, 유동인구, 담배연기, 내부차량 등 다양한 외부요인에 따른 측정값의 신뢰도 하락 가능성을 고려하여 최대한 방해요인의 영향이 작은 지점들을 조사대상 지점으로 선정하였다. 그림 1에 제시한 바와 같이 A구역에서 6지점, B구역에서 7지점, C구역에서 2지점으로 총 15군데를 선정하여 조사를 실시하였다.

측정은 이른 오후 시간대 2PM과 저녁시간대 7PM으로 정하여, 하루에 두 차례 측정하였다. 현장조사는 2014년 10월 22일부터 11월 17일까지의 기간 중 사람들이 모이는 규모를 기준으로 비교적 한산한 주중과 많이 모이는 주말(금요일도 포함)을 각각 3일과 2일을 포함하는 총 5일을 택하여 측정하였다. 그런데 10월 22일의 경우, 측정값에 오류발생 문제로 인해 11월 17일을 대체일로 정하여 다시 측정을 실시하였다. 구체적인 현장조사 일정표는 표 1에 제시하였다.

측정을 할 때 측정높이는 사람들이 길을 걸어가면서 호흡을 하는 높이에 맞추어 1.5m를 유지하여 1분씩 측정하였다. 가게영업 상황, 유동인구, 차량통행 등 기기측정에 영향을 줄 수 있는 모든 특이사항을 기록하였다. 측정 도중 흡연자나 차량통행이 발생하는 경우, 다시 측정을 하는 방식으로 하여 외부간섭을 배제하는 조건으로 측정을 실시하였다.

미세먼지의 측정은 광산란식 에어로졸 모니터(DusttrackTM DRX, Aerosol monitor 8533; TSI)를 이용해 측정하였다. 이 기기는 미세먼지의 질량과 크기를 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이 기기의 먼지 농도 범위는 $0.001\sim 150\ \text{mg}/\text{m}^3$, 먼지 크기 범위는 $0.1\sim 15\ \mu\text{m}$, 샘플링 flow rate은 $3\ \text{L}/\text{min}$, flow accuracy는 $\pm 5\%$ 이다.

2.2 데이터 컨투어링

데이터 컨투어링(data contouring)은 Surfer프로그램(surfer version 10.1.561 (32-bit), Golden Software, Inc.)을 이용하여 측정값들을 통한 contour map을 만들어 측정결과를 효율적으로 가시화할 수 있게 해주는 분석기법이다. Surfer는 크리깅 기법(kriging method)을 이용하여 최적 공간 예측을 하는 그래픽 전용

1. Densely populated areas (6 points) 2. Thinly populated areas (7 points) 3. Roadside (2 points)

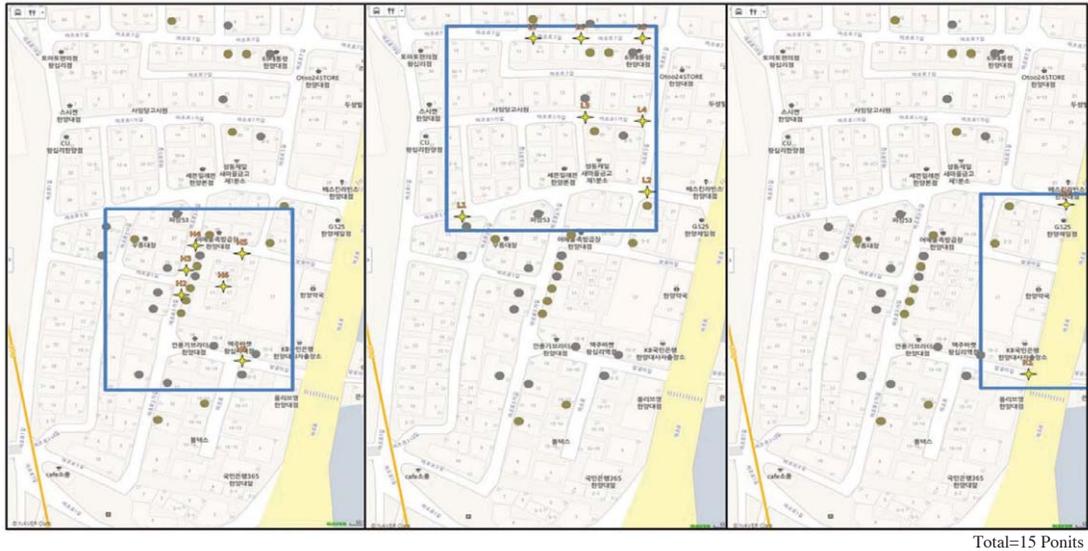


Fig. 1. Location of PM_{2.5} measurements in commercial areas around the Wangsimni station.

Table 1. Date of field study for PM_{2.5} measurements.

Date of experiment	Sampling time	Temperature (°C)	Humidity (%)	Wind velocity (m/s)	Size Cal	Calibration time
2014-10-22	2:00 PM	18	40	1.4, east	0.22	14:15
	7:00 PM	15	45	2.0, southeast	1.02	18:01
2014-10-25	2:00 PM	21.2	51	2.2, west	0.41	13:30
	7:00 PM	18.2	81	1.2, Northwest	0.37	18:40
2014-10-27	2:00 PM	17	72	1.7, Northwest	0.58	13:10
	7:00 PM	10	57	2.4, West	1	19:25
2014-10-31	2:00 PM	16.1	54	1.3, Southeast	0.55	13:00
	7:00 PM	17.4	64	2, Northwest	0.51	18:30
2014-11-17	2:00 PM	9.9	55	3.1, West	0.55	13:00
	7:00 PM	7.8	66	2, west	0.51	18:30

소프트웨어로서 주로 공간 자료분석에 사용한다. 프로그램의 구성은 주어진 측정점들을 크리깅해서 일정한 격자안으로 대입시키는 GRID, 이를 등고선 그림으로 나타내는 TOPO, 3차원 표면 그림으로 재현시키는 SURF와 UTILITY의 4부분으로 이루어져있다.

크리깅 보간법이란 공간통계학 이론에 기반을 두고, 주변 관측값을 이용하여 미지점의 값을 추정하는 공간추정법에 해당한다. 이를 통해, 여러 지점에서 측정된 데이터들을 시각적으로 구분 가능하게 제시할 수 있다. 이 방법은 기존에 사용했던 공간추정법인

IDW법이 가진 객관성의 결여에 대한 문제를 해결한 뛰어난 공간추정법으로 인정받고 있다. 따라서 이 방법을 기반으로 contouring을 실시하였다.

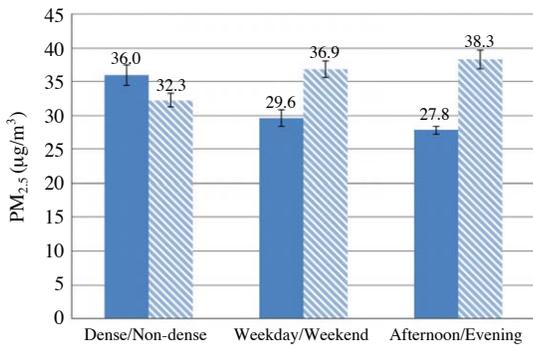
3. 결과 및 토론

3.1 왕십리 상가지역의 PM_{2.5} 분포

그림 1의 지역별 분류상황을 기준으로 보면 배출원 밀집구역에는 주위 배출원이 3개 이상 존재하는

Table 2. Comparison of PM_{2.5} levels by three major criteria selected in this study.

	Crowdedness		Week-weekend effect		Afternoon-Evening effect	
	Densely populated area	Thinly populated area	Weekday	Weekend	Afternoon	Evening
Mean	36.2	32.2	29.9	37.0	27.8	38.3
Median	32.3	31.6	27.6	32.8	29.7	35.0
SD	13.5	11.4	11.1	12.4	5.8	13.7
Min	18.0	18.0	18.0	22.7	18.0	19.4
Max	76.7	81.0	69.7	81.0	38.5	81.0
N	76	113	81	108	82	107
P(2-tailed test)	0.046		1.90E-05		1.12E-12	

**Fig. 2. Comparison of the mean PM_{2.5} values divided by three major criteria selected in this study.**

지역이다. 특히 H2, H3, H4 지점에는 많은 직화구이 음식점이 분포하고 있다. 비밀집구역은 주위 배출원이 2개 이하이고, 큰 대로변 지대를 중심으로 선정하였다. 도로변은 주위에 배출원이 존재하지 않지만 자동차 배출이 다른 형태의 배출원이 존재한다. 도로변 측정값은, 측정 포인트가 2개 밖에 없어서, 데이터를 따로 분류하는데 어려움이 있기 때문에 비밀집구역에 포함하였다.

그림 2에 타입별, 요일별, 시간별 평균 PM_{2.5} 농도를 제시하였다. PM_{2.5}의 평균농도는 비밀집지역에서 32.3±11.2 µg/m³ 그리고 밀집지역에서는 36.0±13.1 µg/m³로 11.5%의 차이가 나타났다. 두지역의 농도 차이는 95% 신뢰수준으로 조사했을 때 유의한 것으로 나타났다. 주중에는 29.6±10.8 µg/m³, 주말에는 36.9±12.1 µg/m³로 24.7% 차이가 나타났다. 주중과 주말의 미세먼지 농도차이는 95% 신뢰수준으로 조사했을 때 유의한 것으로 나타났다. 그리고 이른 오후 시간대에는 27.8±5.8 µg/m³, 저녁시간대에는 38.3 (13.7) µg/m³로 37.8% 차이가 나타났다. 이른 오후 시

간대의 최대 PM_{2.5} 농도는 38.5 µg/m³를 기록하였지만, 저녁시간대의 최대 농도는 81.0 µg/m³으로 나타나 양자 간에 큰 차이를 보였다(표 2). 오후와 저녁의 농도차이는 95% 신뢰수준으로 조사했을 때 유의한 것으로 나타났다. 세 개의 비교 집단 중 높은 값을 기록한 밀집지역, 주말, 저녁시간대의 측정값을 추가적으로 비교하였다.

데이터 컨투어링(data contouring) 기법을 적용하여 PM_{2.5}의 농도분포를 분석한 결과, 그림 3-(A)에 나타난 것과 같이 주중에는 밀집 지역에서 높은 값이 분포하는 것을 알 수 있다. 반면, 주말에는 밀집지역과 비밀집지역 한 곳에서 높은 값이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 3-(B)에서, 이른 오후 시간대에는 밀집지역과 비밀집지역의 한 곳에서도 주말의 농도분포와 비슷한 경향을 보였다. 반면 저녁시간대에는 비밀집지역의 농도가 높음을 알 수 있다.

3.2 밀집 지역의 PM_{2.5} 분포

평균적으로 밀집지역의 PM_{2.5}는 주중 33.3±13.2 µg/m³이고 주말에는 38.1±12.6 µg/m³으로 14.4%의 차이가 나타났다. 그러나 밀집지역에서 주중/주말의 농도차이는 95% 신뢰수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 밀집지역의 이른 오후 시간대에는 26.8±5.5 µg/m³, 그리고 저녁 시간대에는 42.6±13.0 µg/m³으로 59.0%의 차이가 나타났다. 밀집지역에서는 요일보다 시간대의 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 오후와 저녁의 미세먼지 농도차이는 95% 신뢰수준으로 조사했을 때 유의한 것으로 나타났다. 이른 오후 시간대에는 영업하는 식당이 상대적으로 드물기 때문에 배출원에서 미세먼지가 추가로 발생되지 않아 두 지역간의 농도차이가 거의 미미하게 나타났다. 주말에는 비밀집지역의 많은 가게들이

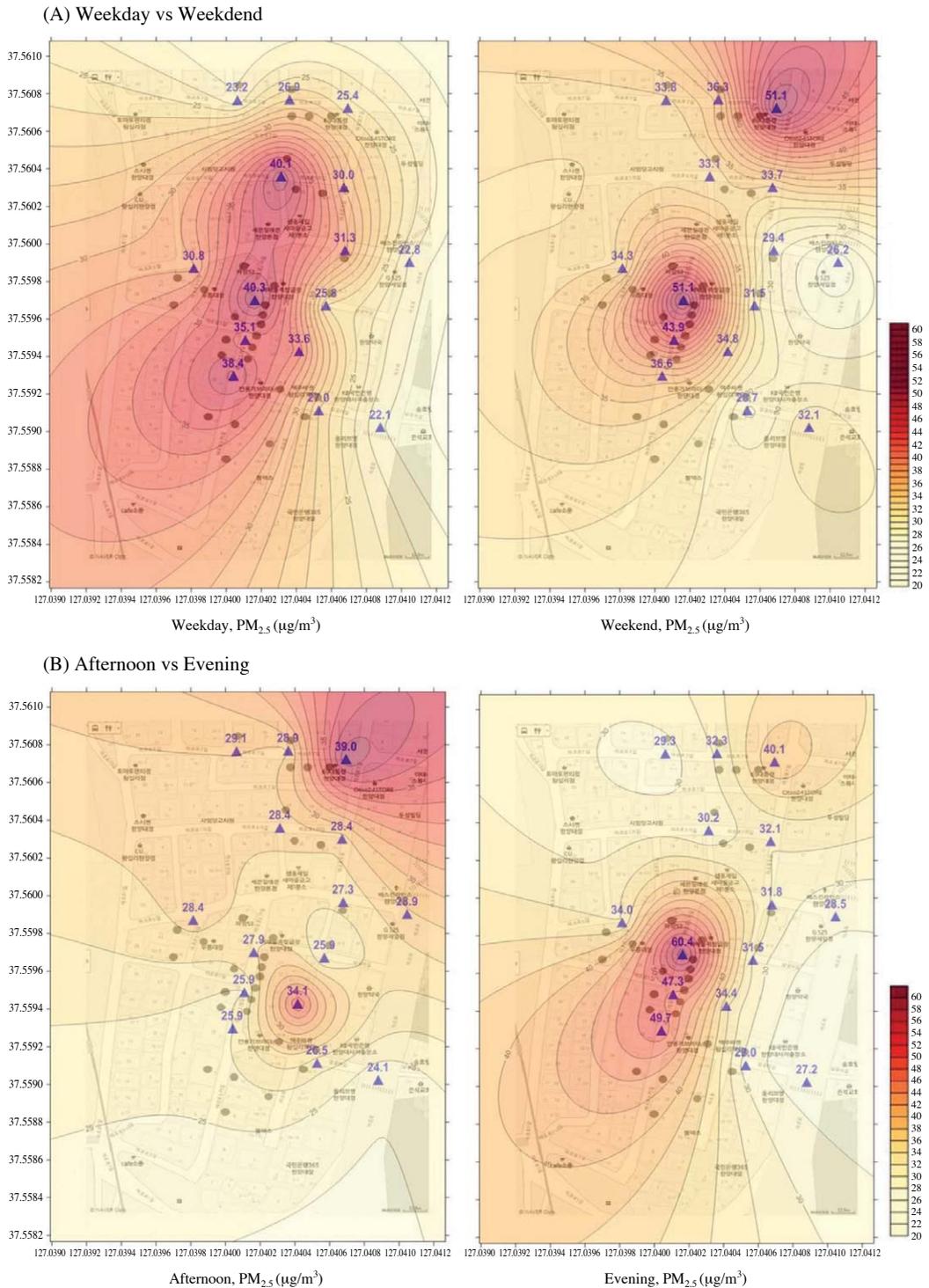


Fig. 3. The spatial contouring of average PM_{2.5} values in the study area.

Table 3. Comparison of PM_{2.5} levels between afternoon and evening time bands.

	Afternoon		Evening		Afternoon		Evening	
	Weekday	Weekend	Weekday	Weekend	Densely populated area	Thinly populated area	Densely populated area	Thinly populated area
Mean	20.9	31.2	34.0	42.7	26.8	28.5	42.6	35.3
Median	19.5	31.7	32.0	38.0	29.0	30.4	40.9	32.0
SD	3.6	2.9	10.6	15.0	5.5	5.9	13.0	13.3
Min	18.0	25.0	19.4	22.7	18.0	18.0	25.0	19.4
Max	31.7	38.5	69.7	81.0	36.0	38.5	76.7	81.0
N	27	55	54	53	32	50	44	63
P(2-tailed test)	0		5.77E-04		0.203		1.91E-07	

바리게이트를 열고 영업을 하므로 미세먼지농도가 올라가는 것으로 사료된다. 밀집지역에는 유동인구 증가와 바리게이트 개방으로 인해 미세먼지농도가 감소하여, 두 지역간의 농도차이가 크지 않다는 결과가 나온 것으로 추정된다.

3.3 주말의 PM_{2.5} 분포

평균적으로 주말의 비밀집지역 PM_{2.5}는 36.1 ± 11.8 µg/m³, 밀집지역은 38.1 ± 12.6 µg/m³으로 5.54%의 미미한 차이가 나타났다(주말의 밀집과 비밀집지역의 미세먼지 농도차이가 95% 신뢰수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다). 주말의 이른 오후 시간대에는 31.2 ± 2.9 µg/m³, 저녁 시간대에는 42.7 ± 15.0 µg/m³으로 양자간에 36.9% 차이가 나타났다. 이러한 차이는 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다. 이를 통해, 주말에는 상가 밀집 여부보다 시간대의 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있다(표 3). 주말이 주중보다 가계손님이 전체적으로 많았지만, 밀집구역에서는 주중에도 일정 수준이상 미세먼지가 방출되기 때문에, 그 차이가 적정 수준을 유지하는 것으로 추정된다.

3.4 저녁 시간대의 PM_{2.5} 분포

평균적으로 저녁 시간대의 PM_{2.5}는 비밀집지역에서 35.3 ± 13.3 µg/m³, 밀집지역은 42.6 ± 13.0 µg/m³으로 20.7% 차이가 나타났다. 이러한 차이는 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다. 저녁 시간대의 PM_{2.5}는 주중 34.0 ± 10.6 µg/m³와 주말 42.7 ± 15.0 µg/m³로 나타나 25.6% 차이를 보였다. 이러한 차이는 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다. 오후는 대부분의 직화구가 음식점과 같은 주요 배출원들

이 영업 준비중인 상태이다. 영업활동이 미미하기 때문에 미세먼지 발생요인이 거의 없고, 그 결과 시간대의 차이가 PM_{2.5}의 농도차이에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

3.5 기존 연구와 비교

본 연구결과는 선행 연구들의 결과와 다양한 관점에서 비교해 볼 수 있다. 부산시내 상업지역(광복동)의 2012년 3월부터 9월까지의 평균 PM_{2.5} 농도는 32.7 µg/m³ 수준이다(Kim, 2013). 부산의 공업지역(장림동, 학장동, 녹산동)은 2011년부터 2012년까지 2년간 평균 PM_{2.5} 농도가 35.3 µg/m³으로 나타났다(Jeon *et al.*, 2014). 대구지역 공업지역(이현동)에서 2011부터 2년간 측정된 평균 PM_{2.5} 농도는 33.5 µg/m³ 정도로 나타났다(Do *et al.*, 2014). 서울시 연평균 PM_{2.5} 농도는 서울시 전체 25 µg/m³, 성동구 24 µg/m³이다(Seoul Air Quality Information, 2013). 본 연구에서는 왕십리 상업지역 전체 평균 PM_{2.5} 농도가 33.6 µg/m³로 측정되었다. 이는 서울 도심지보다 비교적 높은 수준이고, 부산시내 상업지역 및 부산, 대구의 공업지역과는 높은 유사성을 보였다. 본 연구와 선행연구에서 측정을 실시한 지역 중, PM_{2.5}의 연평균 대기환경기준(2015년 1월 1일 시행)인 25 µg/m³ 미만을 초과하는 결과는 성동구로 나타났다.

또한, 국내와 국외의 도시지역과 해안지역의 선행 연구 결과와 비교해 보았다. 대도시인 베이징과 멕시코 지역의 PM_{2.5} 연평균 농도는 각각 115와 94.4 µg/m³으로 본 연구결과보다 훨씬 높은 농도를 보였다(He *et al.*, 2001; Barbiaux *et al.*, 1992). 뉴욕, 시카고, 워싱턴, 로스앤젤레스, 그리고 샌프란시스코 지역의 농도는 12.7, 12.9, 10.7, 14.8, 9.2 µg/m³으로 상대적으로 다

Table 4. Comparison of PM_{2.5} levels between densely and thinly populated area.

	Densely populated area		Thinly populated area		Densely populated area		Thinly populated area	
	Weekday	Weekend	Weekday	Weekend	Afternoon	Evening	Afternoon	Evening
Mean	33.3	38.1	27.0	36.1	26.8	42.6	28.5	35.3
Median	31.3	32.9	25.7	32.9	29.0	40.9	30.4	32.0
SD	13.2	12.6	7.7	11.8	5.5	13.0	5.9	13.3
Min	18.0	26.0	18.0	22.7	18.0	25.0	18.0	19.4
Max	69.7	76.7	49.0	81.0	36.0	76.7	38.5	81.0
N	34	42	47	66	32	44	50	63
P(2-tailed test)	0.111		6.96E-07		5.68E-13		2.47E-04	

Table 5. Comparison of PM_{2.5} levels between weekday and weekend.

	Weekday		Weekend		Weekday		Weekend	
	Densely populated area	Thinly populated area	Densely populated area	Thinly populated area	Afternoon	Evening	Afternoon	Evening
Mean	33.3	27.0	38.1	36.1	20.9	34.0	31.2	42.7
Median	31.3	25.7	32.9	32.9	19.5	32.0	31.7	38.0
SD	13.2	7.7	12.6	11.8	3.6	10.6	2.9	15.0
Min	18.0	18.0	26.0	22.7	18.0	19.4	25.0	22.7
Max	69.7	49.0	76.7	81.0	31.7	69.7	38.5	81.0
N	34	47	42	66	27	54	55	53
P(2-tailed test)	0.012		0.403		2.22E-16		4.85E-08	

른 지역에 비해 낮은 농도를 보였다(Air Korea, Ministry of Environment, 2009). 또한 일반 도시의 경우 헤밀턴이 19.0 µg/m³ (Brook *et al.*, 1997)로 상대적으로 낮은 농도를 보였고, 경기, 인천, 춘천 지역은 각각 35, 29.4, 27.8 µg/m³의 농도를 나타내었다(Air Korea, Ministry of Environment, 2013). 또한, 제주지역과 강화 지역은 각각 19.8, 25.6 µg/m³로 본 연구결과보다 낮은 농도를 보였다(Kang *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2000).

4. 결 론

본 연구에서는 왕십리 상업지역의 생활분진 발생 특성을 연구하기 위해 조사대상을 배출원 밀집지역, 비밀집지역, 도로변의 3개의 유형을 나누어 총 15 지점에서 PM_{2.5} 미세먼지의 농도를 측정하였다. 이들 PM_{2.5} 관측 데이터를 토대로 컨투어링 기법을 이용하여 왕십리 상업지역의 미세먼지의 농도분포에 대한 지도를 작성하였다. 그리고 공간적 및 시간적 기준으로 미세먼지의 분포에 대한 특성을 설명하기 위

해 여러 가지 통계적 기준으로 비교하였다.

환경정책기본법 시행령 제2조의 PM₁₀(연간 평균치 100 µg/m³ 이하, 24시간 평균치 50 µg/m³ 이하) 초과하지 않으며 서울시 미세먼지 예보 기준을 감안할 때 ‘보통’(30~81 µg/m³)에 해당하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 조사대상으로 선정한 왕십리 상업지역의 PM_{2.5} 평균농도는 33.6 µg/m³으로 나타났다. 이들 결과는 PM₁₀ 기준과 바로 비교할 수는 없지만 적정 수준의 오염이 유지되는 것을 알 수 있다. 또한 측정값들을 공간적 및 시간적 기준으로 나누어 비교한 결과, 유동인구가 많거나 배출원이 밀집한 지역일 수록 그리고 주중보다는 주말 또는 이른 오후보다는 저녁시간대의 미세먼지 농도가 높은 것으로 나타났다.

이들 자료에 대한 통계적 검정을 실시한 결과 대부분의 비교기준에 대해 미세먼지의 농도차이가 유의하다는 결과를 확인하였다. 이를 통해, 왕십리 상업지역의 미세먼지 농도는 유동인구, 직화구이 음식점 등에서 배출되는 물질들의 영향이 민감한 인자로 작용하는 것을 유추할 수 있다. 본 연구를 통하여 현재 미세먼지 규제방안의 검토와 규제 가이드라인 보완

및 식당가 부근의 미세먼지 배출 관리에 대한 체계적인 방안의 도출에 일조하고자 하였다. 따라서 상업지역 미세먼진에 대한 문제점의 인식재고와 개선방향에 대한 검토가 체계적으로 이루어지기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호 2009-0093848).

References

- Barblaux, M., P.A. Scheff, and L.R. Babcock (1992) Characterization of respirable particulate matter in Mexico city, Mexico, Presentation at the 9th World Clean Air Congress and Exhibition, Montreal, Canada, August 30-September 4, IU-7.07.
- Brook, J.R., A.H. Wiebe, S.A. Woodhouse, C.V. Audette, T.F. Dann, S. Callaghan, M. Piechowski, D.Z. Ewa, and J.F. Dlouhy (1997) Temporal and spatial relationships in fine particle strong acidity, sulfate, PM₁₀, and PM_{2.5} across multiple Canadian locations, Atmospheric Environment, 31(24), 4223-4236.
- Choi, M.-K., H.-G. Yeo, J.E. Lim, K.-C. Cho, and H.-K. Kim (2000) Characteristics of PM_{2.5} in Kangwha, J. KOSAE, 16(6), 573-583. (in Korean with English abstract)
- Do, H.-S., S.-J. Choi, M.-S. Park, J.-K. Lim, J.-D. Kwon, E.-K. Kim, and H.-B. Song (2014) Distribution Characteristics of the Concentration of Ambient PM-10 and PM-2.5 in Daegu Area, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 36(5), 20-28. (in Korean with English abstract)
- Han, S.-W. (2014) Analysis of the properties of Particle Matter in Busan and Daegu. Busan University (Master thesis).
- He, K., F. Yang, Y. Ma, Q. Zhang, X. Yao, C.K. Chan, S. Cadle, T. Chan, and P. Mulawa (2001) The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China, Atmos. Environ., 35, 4959-4970.
- Jang, J.H., N.K. Pyong, and T.K. Hong (2003) Spatial Data Analysis using the Kriging Method, The Korean Communications in Statics, 10(2), 423-432. (in Korean with English abstract)
- Jeon, B.I., Y.S., Hwang, and H.W. Lee (2005) Characteristics of Heavy Metallic Elements of Fine Particles of 2004 in Busan. Korean Society for Atmospheric Environment, 321-322.
- Kang, B.-W., M.-H. Jung, J.-M. Jeon, and H.-S. Lee (2011) The Characteristics of PM_{2.5} and Acidic Air Pollutants in the Vicinity of Industrial Complexes in Gwangyang, J. KOSAE, 27(1), 16-29. (in Korean with English abstract)
- Kang, C.-H., W.-H. Kim, J.-S. Han, Y. Sunwoo, and K.-C. Moon (2003) Pollution characteristics of PM_{2.5} fine particles collected at Gosan site in Jeju island during 1997~2001, J. KOSAE, 19(3), 263-273. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.-H. and D.-S. Kim (2000) Studies on the environmental behaviors of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ in Suwon area, J. KOSAE, 16(2), 89-101. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.-P. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, J. KOSAE, 22(5), 535-553. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.-S. (2013) PM₁₀ and PM_{2.5} Source Identification Study in Industrial and Commercial Region. Donga University (Ph.D thesis).
- Lee, S.H., B.W. Kang, I.J. Yeon, J.R. Choi, H.P. Park, S.C. Park, H.-S. Lee, and B.-Y. Cho (2012), Analysis of PM_{2.5} case study burden at Chungju city, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(5), 595-605. (in Korean with English abstract)
- Park, E.-J. (2008) Health Risk Assessment of Fine Particles and Their Hazardous Chemicals. Dong-Duk University (Ph.D thesis).
- Sung, D.G., T.S. Kim, I.L. Jung, T.K. Kim, and K.S. Joe (1999) A Study on the Estimation of Mobile Source Emission by Kriging Interpolation in the GIS Environment, Korean Journal of Geomatics, 17(3), 273-282.