

## 철강 산업도시 포항의 미세먼지 농도 및 관련 기상자료에 대한 통계적 분석

### Statistical Analysis of PM<sub>10</sub> and Meteorological Data in Pohang, a Steel-Industrial City

최민석 · 백성옥\*

영남대학교 환경공학과 대기환경연구소

(2016년 4월 25일 접수, 2016년 5월 24일 수정, 2016년 5월 25일 채택)

Min-Suk Choi and Sung-Ok Baek\*

*Air Quality Lab., Department of Environmental Engineering, Yeungnam University*

(Received 25 April 2016, revised 24 May 2016, accepted 25 May 2016)

#### Abstract

Pohang is a well-known industrial city in Korea with a large steel-industrial complexes. The biggest environmental issue in the city is associated with fine particulate matter (hereinafter, PM<sub>10</sub>). The concentration of PM<sub>10</sub> is generally dependent on the local emission sources and meteorological conditions. Iron and steel industrial complexes are likely serious pollution sources of PM<sub>10</sub> in Pohang. In this study, daily PM<sub>10</sub> data from a large database from the year of 2000 to 2012 were statistically analyzed, together with meteorological data. The average concentrations of PM<sub>10</sub> were evaluated according to the frequency of Asian dust, haze, mist, and fog. The number of days exceeding short-term standard for PM<sub>10</sub> were also examined, taking into consideration of weather conditions. It was found that the concentration of PM<sub>10</sub> was reduced about 18% to 26% because of precipitation. In addition, the effects of wind direction and wind speed on the PM<sub>10</sub> concentrations were investigated.

**Key words :** PM<sub>10</sub>, Steel industry, Asian dust, Haze, Wet scavenging, Wind speed

#### 1. 서론

최근 우리나라 환경문제 중 가장 큰 이슈는 미세먼지로 인한 스모그(smog) 문제이다. 스모그란 smoke(연기)와 fog(안개)의 합성어로 연기와 안개가 섞인 것 또는 안개가 연기로 더럽혀진 것을 의미하지만, 일반

적으로 안개나 습도에 관계없이 대기오염에 의해 도시의 공기가 더럽혀져 눈앞이 잘 보이지 않는 현상을 말하기도 한다.

미세먼지에는 중금속 등 각종 유해물질이 포함되어 있어 인체에 악영향을 줄 수 있다. 국내 대기보전법에서 통칭되고 있는 미세먼지(이하 PM<sub>10</sub>)란 공기역학적 등가경이 10 μm 이하인 입자를 의미한다. 이러한 물리적 특성을 가진 PM<sub>10</sub>은 비표면적이 크고 가시거리를 짧게 만들어 시정거리에 직접적인 영향을 주며, 보건학

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)53-810-2544, E-mail : sobaek@yu.ac.kr

적으로는 폐에 쉽게 흡착되고 먼지에 함유되어 있는 각종 유해물질로 인하여 호흡기 질환 및 폐암과 같은 부정적인 영향을 일으킨다(Bahadur *et al.*, 2009; Brunelli *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2003; Heidi, 2000; Carlton *et al.*, 1999; Berico *et al.*, 1997). 또한 PM<sub>10</sub>의 농도가 10 µg/m<sup>3</sup> 더 증가할 때마다 하루 중 사망률이 0.5~1.5% 증가한다고 보고된 바 있으며(Pope *et al.*, 1995) 다른 연구결과에서도 대기 중 먼지의 농도가 증가함에 따라 사람들의 질병 및 사망률에도 영향을 준다고 알려진 바 있다(Kim *et al.*, 2015). 이에 따라 환경부는 PM<sub>10</sub>에 대한 대기환경기준을 2007년부터 강화한 바 있다. PM<sub>10</sub>보다 환경보건학적 측면에서 더 큰 문제가 되는 PM<sub>2.5</sub>의 환경기준은 2015년부터 적용되고 있다. 결국 우리나라는 향후 PM<sub>10</sub>을 포함한 대기오염으로 인한 국민 건강 피해를 예방하기 위해서는 각종 대책마련과 함께 환경기준을 점차 강화해 나갈 필요가 있다.

대기오염물질은 특성상 몇몇 기상요인에 민감한 영향을 받는다. 대표적인 기상요인으로는 풍속과 풍향, 강수량, 기온, 상대습도 등이 있다. 이러한 기상요인은 대기오염물질의 농도 변동요인을 설명하는 데 중요하게 작용한다(Hwang *et al.*, 2009; Bäumer *et al.*, 2008; Song and Shon, 2008; Kim *et al.*, 2007; Laakso *et al.*, 2003). PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 농도수준과 함께 각 미세먼지에 함유된 성분들의 화학 조성도 각 기상조건으로 인한 변동요인이 있는 것으로 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2009; Won *et al.*, 2008). 먼저 풍속에 따른 영향을 중점적으로 본다면 일반적으로 풍속이 증가하면 PM<sub>10</sub> 농도가 감소한다고 알려져 있다(Shin *et al.*, 2007). 그러나 풍속이 일정 수준을 넘어서면 오히려 PM<sub>10</sub> 농도가 증가하는 현상이 나타날 수도 있는데 이는 침적된 먼지의 재 비산으로 인한 영향이라고 볼 수 있다(Lee and Kim, 2008). 또한 풍속에 의한 영향과는 별개로 풍향에 따라 대기오염물질 발생원과 그에 따른 피해지역이 결정되기도 한다(Shin *et al.*, 2007).

대기 중의 부유먼지는 비가 내리면 비에 의한 세정 효과가 나타나므로 먼지 농도와 강수량은 음의 상관관계에 있다고 알려져 있다. 대한민국 전역의 강수에 의한 총괄세정기여율은 PM<sub>10</sub> 기준으로 22.3%를 저감할 수 있는 높은 수준이라고 보고된 바 있다(Lim *et al.*, 2012). 강수나 바람 이외에 대기질에 영향을 주는 기상요인으로는 황사, 연무, 안개, 박무 등을 들 수 있다

(Shin *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2004; Lim *et al.*, 2004). 황사는 중국에서 날아오는 비교적 큰 먼지로 과거에는 자연현상의 하나로 간주되어 온 날씨요소였다. 하지만 연무와 박무, 그리고 안개는 그 발생한 날의 국지적 기상조건과도 밀접한 연관이 있다. 특히 연무는 자연적 배출원보다 인위적인 배출원의 영향이 더 심각하기 때문에 더 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 연무는 하절기에 도시지역에서 광화학적 스모그 등의 2차 생성물질로 인하여 발생하기도 한다. 또한 연무는 특정지역 내 발생하여 정체되는 사례(64.5%)뿐만 아니라 타 지역으로 이동되는 사례(35.5%)도 무시할 수 없는 수준으로 알려져 있다(Jo and Kim, 2011). 이와 같은 연무가 발생하면 일반적으로 PM<sub>10</sub>은 물론이고 SO<sub>2</sub> 등과 같은 가스상 오염물질 역시 고농도를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2009).

포항지역은 국내 최대 규모의 철강 산업단지가 조성되어 우리나라 국가경제와 지역발전에 지대한 공헌을 하고 있다. 그러나 철강 산업은 그 특성상 철광석과 석탄 등 화석연료를 많이 사용하므로 아황산가스와 먼지 오염의 가능성이 매우 높다. 다행히도 우리나라는 저황연료 사용 정책의 결과 아황산가스 오염도는 크게 개선되었다. 그러나 여전히 먼지오염도는 전국적으로도 크게 개선되지는 않고 있으며, 더욱이 포항지역에서는 최근에 대기오염으로 인한 환경청원이 제기되는 등 미세먼지로 인한 대기오염이 지역사회에 큰 문제점으로 부각되고 있다.

본 연구에서는 먼지오염문제가 심한 것으로 알려진 포항지역에서 2001년부터 2012년까지 12년간 측정된 PM<sub>10</sub> 농도 자료를 대상으로 먼지 농도의 지역적 및 계절적 변동요인을 기상자료와 함께 분석하여 이 지역의 기상조건에 따른 먼지오염도 변화 특성을 파악하고자 하였다. 나아가 포항지역 PM<sub>10</sub>의 장기기준 및 단기기준 달성여부에 대한 분석과 함께 향후 이 지역에서의 대기환경관리를 위한 과학적 정보를 제공하고자 하였다.

## 2. 연구대상지역 및 자료의 선정

### 2.1 연구대상지역

포항은 대한민국에서 제철 산업단지이자 해안도시로 유명한 곳이다. 그림 1에는 장흥동과 죽도동의 대기



**Fig. 1. Locations of Jukdo-dong and Jangheung-dong air quality monitoring stations and a weather station in Pohang.**

측정소 및 송도동의 포항기상대의 위치를 나타내었다. 먼저 포항 철강 산업단지 안에 위치한 장흥동의 북동쪽에는 (주)포스코가 위치해 있다. 남동쪽에는 포항 철강 산업단지가 밀집해 있고 남서쪽에는 산으로 둘러싸여 있으며 북서쪽에는 상가가 밀집해있다. 다음으로 비교적 포항 철강 산업단지와 멀리 떨어져 있고 주거 지역 안에 위치한 죽도동의 경우 북동쪽에는 동해가 있고 남동쪽에는 (주)포스코가 자리하고 있다. 남서쪽에는 야산과 상가가 밀집해 있고 북서쪽에는 비교적 높은 산으로 둘러싸여 있다. 한편, 포항기상대는 해안가에 가까운 송도동에 위치해 있다.

**2.2 미세먼지 및 기상자료**

통계적 분석에 있어서 표본 크기가 클수록 분석 결과의 신뢰성은 높아진다. 본 연구에서는 포항지역에 설치된 장흥동과 죽도동의 대기오염 자동측정소에서 2001년부터 2012년까지 측정된 PM<sub>10</sub>의 시간별 측정자료(n=105,192개)를 대상으로 0시에서 24시까지의 일평균 자료(n=4,383개)로 변환하였다. 본 연구의 PM<sub>10</sub> 농도 자료는 β-ray 방법으로 측정된 국가대기질 측정망의 자료 D/B를 이용하였으며(Air Korea, 2014), 시간대별 결측치가 있는 경우에는 하루 중 유효측정비율 75% 이상인 자료만 일평균 자료로 활용하였다(NIER, 2011).

통계적 분석을 수행하기 위해서는 PM<sub>10</sub> 농도 자료와의 연관성을 위해 같은 기간의 기상자료를 모으는 것이 중요하다. 본 연구에서는 포항시 송도동에 위치한

기상대에서 필요한 기상자료를 PM<sub>10</sub>과 같은 방식으로 2001년부터 2012년까지의 시간대별 측정 자료를 일평균 자료로 변환하였다. 사용한 기상인자는 기온, 상대습도, 풍향, 풍속, 강수량, 일사량 및 시정거리 등 총 7가지 항목이었다. 본 연구에서는 편의상 각 항목의 대표치는 모두 산술평균값으로 나타내었다.

기상요소뿐만 아니라 날씨도 중요한 정보를 제공한다. 날씨요소로는 황사(Asian dust), 연무(haze), 안개(fog) 및 박무(mist)가 있다. 기상청의 정의에 의하면 황사란 중국 황토 고원에서 발원하여 이동되는 모래입자를 말한다. 연무란 시정거리가 1 km 이상으로 습도가 비교적 낮을 때(상대습도 70% 이하) 발생하는 연기·먼지 등의 미세한 입자가 떠있는 것을 말한다. 반면 박무는 연무와 같은 1 km 이상의 시정거리지만 상대습도가 비교적 높을 때(상대습도 70% 이상) 발생하는 것으로 작은 물방울이 떠다니는 것을 말한다. 또한 안개란 상대습도가 80% 이상으로 시정거리 또한 1 km 미만일 때로 정의된다(Pohang Weather Station, 2014).

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 포항지역 기상 및 미세먼지 농도 특성**

대기오염물질의 농도는 국지적인 배출량과 이들 오염물질을 수용하는 대기환경용량에 따라 결정된다. 또한 대기환경용량은 기상요인에 따라 결정된다. 본 연구에서 사용한 포항지역에서의 12년간의 미세먼지 및 기상자료에 대한 전반적인 분포 양상은 표 1에 요약하였다.

2000년 이후 포항에서는 연평균 8일의 황사가 기록되었으며 발생빈도의 증감추세는 뚜렷한 경향을 보이고 있지는 않았다. 반면에, 연무와 안개 및 박무 발생일은 각각 연평균 22일, 2일 및 93일인 것으로 나타났다. 특이한 점은 최근으로 올수록 안개의 발생빈도는 줄어드는 반면, 연무와 박무의 발생빈도는 상대적으로 늘어나고 있다는 점이다.

표 2에는 12년간의 기상인자 및 미세먼지 전체 자료를 그날의 날씨 상태에 따라 분류한 결과를 나타내었다. 여기서 날씨요소로 ‘맑은 날(clean)’, ‘강수일(rain)’, ‘갈수일(drought)’ 및 ‘황사’, ‘연무’, ‘안개’, ‘박무’가 발생한 날로 구분하였다. 전체 자료를 보면 포항

**Table 1. A summary of meteorological and PM<sub>10</sub> data form 2001 to 2012 in Pohang.**

Year	Date	Mean Temp. (°C)	Mean R.H. (%)	Mean W.S. (m/s)	Number of days					Mean PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	
					Rain	Asian dust	Haze	Fog	Mist	Jangheung	Jukdo
2001	365	15.0	58	3.3	102	22	4	7	58	61.9	45.0
2002	365	14.3	59	2.9	102	12	2	2	93	68.3	51.5
2003	365	14.0	64	2.7	121	2	1	4	97	72.0	57.3
2004	366	15.2	61	2.7	107	5	0	3	54	74.8	58.1
2005	365	14.1	59	2.8	97	3	4	1	100	76.3	48.2
2006	365	14.4	64	2.6	113	11	2	3	132	78.3	50.9
2007	365	14.7	66	2.2	117	7	12	0	100	76.4	47.5
2008	366	14.1	65	2.1	97	6	62	0	84	70.3	61.3
2009	365	14.8	63	2.2	100	7	64	2	88	66.7	53.3
2010	365	14.6	65	2.2	98	11	47	1	89	67.7	41.9
2011	365	14.3	63	2.2	100	4	47	1	105	68.1	40.6
2012	366	14.2	65	2.2	113	1	17	2	113	58.3	35.4
Mean	365	14.5	62.7	2.5	105	8	22	2	93	69.9	49.3
Total	4383	-	-	-	1267	91	262	26	1113	-	-

**Table 2. Classification of meteorological and PM<sub>10</sub> data according to the weather conditions.**

Weather condition	Number of days	Temp. (°C)	R.H. (%)	Prevailing wind	Wind speed (m/s)	Insolation (MJ/m <sup>2</sup> )	Visibility (1 km)	Jangheung PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Jukdo PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
All	4383	14.5	62.7	SW	2.5	14.0	16.3	69.9	49.3
Clean	2446	12.4	53.6	SW	2.6	15.9	18.6	67.7	47.1
Rain	1267	16.9	79.4	NE	2.4	8.8	14.0	60.3	39.2
Drought	3116	13.5	55.9	SW	2.5	16.1	17.3	73.8	53.5
Asian dust	91	12.1	44.1	SW	3.2	16.2	13.5	173.6	146.2
Haze	262	14.6	60.6	SW	2.1	15.2	11.2	97.1	78.1
Fog	26	21.4	84.2	NE	1.9	16.3	8.3	79.0	69.6
Mist	1113	18.6	77.9	NE	2.2	12.1	12.0	71.7	53.1

의 주풍향은 남서풍으로 나타났다. 그러나 ‘강수’, ‘안개’, ‘박무’ 상태일 때 주풍향은 북동풍인 것으로 보아 습한 바다 쪽에서 바람이 불 때 상대습도가 올라가고 결과적으로 비가 오거나 안개 및 박무가 발생하는 것으로 보인다. 또한, 연무, 안개, 박무가 발생했을 때 평균풍속이 약 2.0 m/s 정도로서 다른 날씨 조건일 때 비하여 상대적으로 낮은 풍속을 보였다.

표 2에서 볼 수 있듯이 포항지역의 PM<sub>10</sub> 농도는 맑은 날 평균농도가 장흥동이 67.7 µg/m<sup>3</sup> 죽도동이 47.1 µg/m<sup>3</sup> 수준이었으며, 비가 온 날에는 각각 60.3 µg/m<sup>3</sup> 및 39.2 µg/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 것으로 나타났다. 그러나 황사가 발생했을 때 두 지점 모두 가장 높게 나타났으며, 다음으로는 연무 발생 시의 농도가 그 뒤를 이었다. 반면 상대습도와 밀접한 관련이 있는 안개 및 박무

발생 시의 농도는 황사 및 연무 발생 시의 농도에 비하여 상대적으로 낮은 수준으로 나타났다. Hwang *et al.* (2009)의 연구에 따르면 내륙도시인 대구의 2006년 ~2008년 기간 중 연무 발생 시 PM<sub>10</sub>의 평균농도는 104.2 µg/m<sup>3</sup>, 안개 발생 시 54.3 µg/m<sup>3</sup>, 박무 발생 시 63.4 µg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 맑은 날의 경우 48.8 µg/m<sup>3</sup>, 강수 시 35.0 µg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 이와 비교하면 포항은 대구에 비해 PM<sub>10</sub> 농도가 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 반면 포항과 같은 항구도시인 인천의 경우 기존 연구에 따르면 2005년 연무 발생 시 PM<sub>10</sub>의 평균농도는 117.4 µg/m<sup>3</sup>, 안개 발생 시 114.1 µg/m<sup>3</sup>, 박무 발생 시 92.3 µg/m<sup>3</sup>로서 세 가지의 날씨요소 발생 시 모두 높게 나온 사례도 있다(Shin *et al.*, 2007). 따라서 대기 중 미세먼지의 농도는 단순히 기상요소뿐만 아니라 그

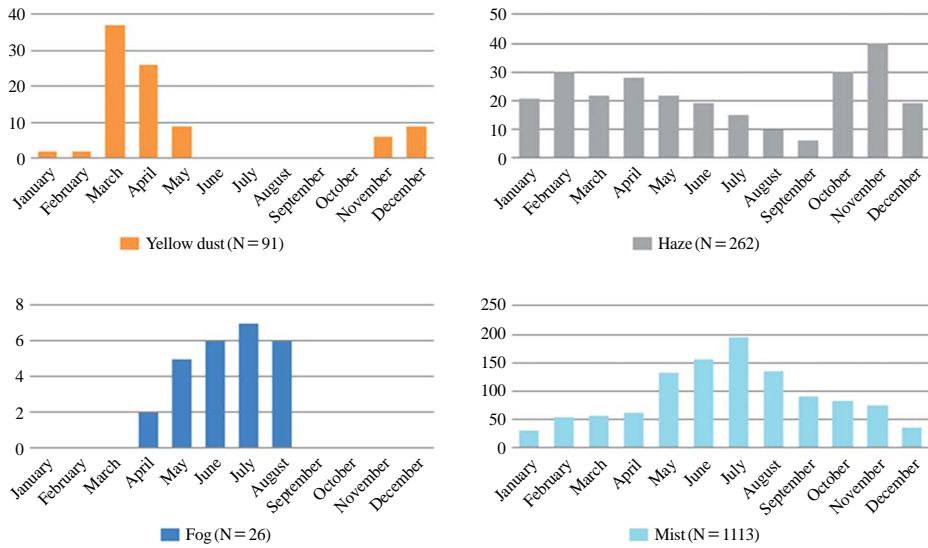


Fig. 2. Monthly cumulative incidence days of Asian dust, haze, fog and mist in Pohang.

도시 내의 발생원 혹은 외부로부터의 유입 등 각 도시마다 특징이 다르게 나타날 수 있다.

그림 2에는 포항의 각 날씨요소별 발생빈도를 월별로 나타내었다. 황사의 발생빈도는 알려진 바와 같이 봄철인 3월, 4월이 가장 많았다. 연무는 상대적으로 건조한 가을인 10월과 11월이 가장 많이 발생했고 겨울과 봄에도 상대적으로 높은 발생빈도를 보였다. 안개의 경우 전 계절 중 가장 습한 여름에 집중적으로 발생했다. 박무도 안개와 성향이 비슷한 여름에 가장 많이 발생했지만 봄과 가을에도 가끔 발생하기도 한다. 포항지역에서 PM<sub>10</sub>의 농도에 직접적인 영향을 미치는 황사와 연무의 발생빈도는 안개 및 박무와 비교했을 때 확연히 다른 양상을 보여주고 있다.

황사, 연무, 안개 및 박무의 월 발생빈도에 따라서 증감되는 PM<sub>10</sub>의 농도를 분석하기 위해 12년간의 전체 자료를 월별로 나누어 월별 PM<sub>10</sub>의 평균농도를 비교하여 그림 3에 나타내었다. 월별 PM<sub>10</sub>의 평균농도를 보면 그림 2의 황사와 연무의 발생빈도 그래프와 유사함을 알 수 있다. 장흥동은 황사의 영향이 가장 크다고 판단되는 4월에 92.4 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높았고 죽도동 역시 봄철인 3월에 67.2 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높은 농도수준이 나타났다. 또한 상대습도가 가장 높고 장마나 태풍의 영향이 큰 여름철이 두 지점 모두 가장 낮은 농도수준

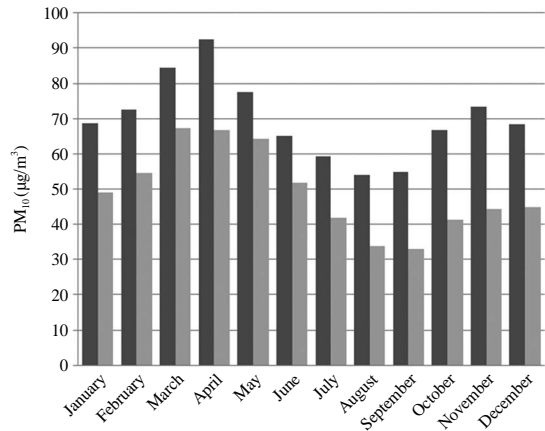


Fig. 3. Monthly averages of PM<sub>10</sub> at Jangheung-dong (black) and Jukdo-dong (grey) in Pohang.

을 보였다.

### 3.2 미세먼지 농도 분포

장흥동과 죽도동의 12년 전체 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 히스토그램을 그림 4에 나타내었다. 편의상 PM<sub>10</sub> 농도가 300 µg/m<sup>3</sup> 이상인 고농도 자료(총 13개)는 그림에서 제외하였다. 12년 기간 중 장흥동의 평균은 69.9 µg/m<sup>3</sup>, 중앙값은 54.5 µg/m<sup>3</sup>, 죽도동의 평균은 49.3 µg/m<sup>3</sup>,

중양값 42.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 두 지점 모두 중양값보다 평균이 더 높은 값을 보이고 있어 대수정규분포 개형에 가깝다고 할 수 있다.

그림 4의 히스토그램을 non-linear curve fitting software인 Fityk 프로그램(Wojdyr, 2010)을 이용하여 각 변곡점을 기준으로 분해한 분포도를 그림 5에 나타내었다. 장흥동의 경우  $\text{PM}_{10}$  농도가 약 130  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  부근과 약 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  부근에서 최빈치를 갖는 두 개의 그룹을 분해할 수 있었으며, 약 85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  부근에도 작은 그룹이 하나 존재하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 표

2에서 나타난 자료를 근거로 높은 농도 그룹은 황사와 연관이 있을 것으로 추정되며, 두 번째 그룹은 연무 발생과 관련 있을 것으로 추정하였다. 그리고 세 번째 작은 그룹은 정확한 원인을 알 수는 없지만 측정지점 인근의 국지적인 오염 에피소드와 관련 있을 것으로 추정하였다. 죽도동의 히스토그램은 비교적 단순하게 나타났으며 약 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  부근에 연무 그룹과 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  부근에는 황사그룹이 존재하는 것으로 예상된다.

이와 같은 추정을 검증하기 위하여 전체 자료를 연무가 발생한 경우와 아닌 경우로 구분하여 두 그룹의

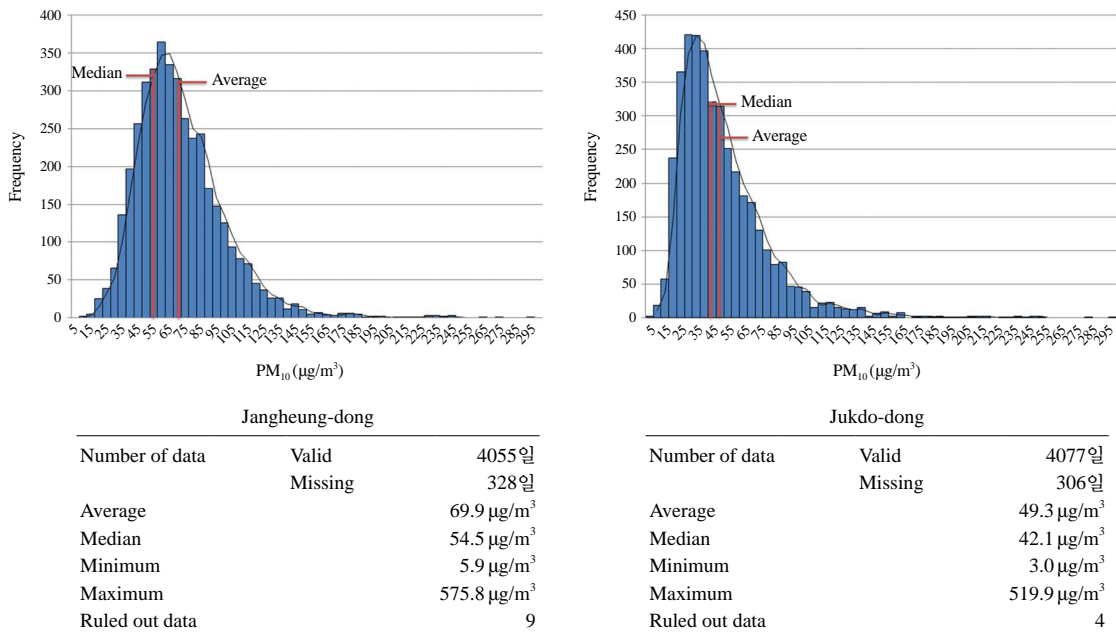


Fig. 4. Histograms of  $\text{PM}_{10}$  concentrations at Jangheung-dong and Jukdo-dong in Pohang.

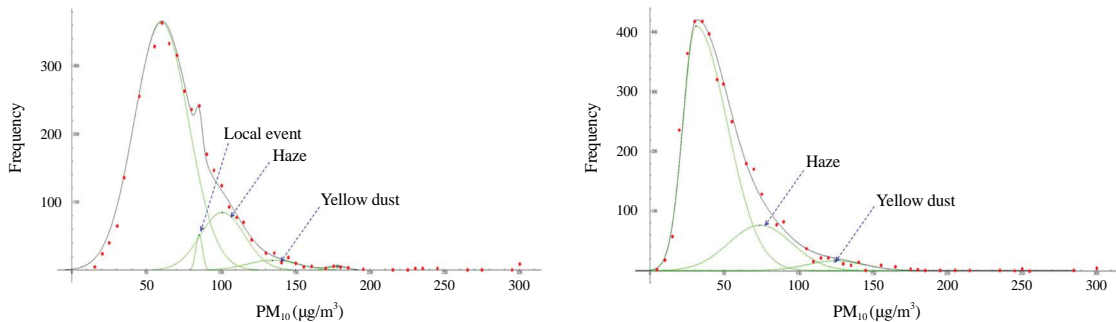


Fig. 5. Histogram decomposition for  $\text{PM}_{10}$  data at Jangheung-dong in Pohang for 12 years.

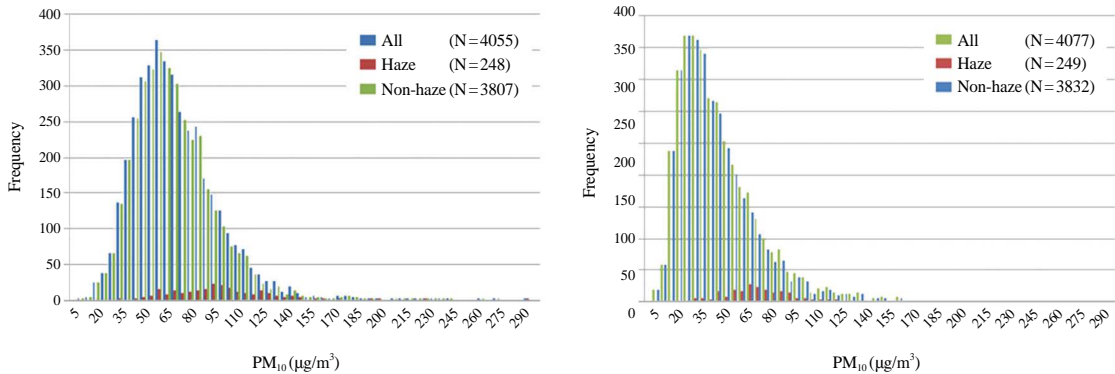


Fig. 6. Histogram decomposition for PM<sub>10</sub> data at Jukdo-dong in Pohang for 12 years.

히스토그램을 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다. Fityk를 이용하여 히스토그램을 분해한 그림 5와 그림 6을 비교하면 연무로 추정된 그룹과 매우 유사한 양상으로 나타남을 알 수 있다. 황사의 경우 역시 자료수가 적어 시각적 표현이 어려워 본문에 제시하지는 않았으나 Fityk를 통한 분해한 결과와 유사한 양상을 보임을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로 미루어 볼 때 포항지역은 미세먼지가 고농도로 나타나는 경우는 일시적인 황사현상을 제외하고는 연무가 많이 발생하는 날과 밀접한 관계가 있다고 보아진다. 따라서 표 1에서 본 바와 같이 최근으로 올수록 그 발생빈도가 증가하고 있는 연무의 발생요인을 규명하여 이를 제어하는 방안을 강구하는 것은 지역 대기환경관리에서 매우 중요한 요건이라고 사료된다.

### 3.3 PM<sub>10</sub> 농도의 단기 환경기준 초과일에 대한 분석

2000년 이후 12년 동안 각 연도별로 두 측정지점에서의 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 24시간 단기기준 초과빈도를 표 3에 나타내었다. 현재 국내 PM<sub>10</sub>의 24시간 환경기준은 100 µg/m<sup>3</sup>로서 연간 3일 이상 초과되어서는 안 된다(2007년 개정). 공업지역에 위치한 장흥동의 연간 초과일수의 평균은 41일, 주거·산업지역에 위치한 죽도동의 평균은 18일로 나타나 두 지점 모두 국내 단기기준을 달성하지 못하였다. 결국 포항은 PM<sub>10</sub>에 상당히 취약한 도시라는 것을 알 수 있다. PM<sub>10</sub>의 경우 단기기준의 달성여부는 건강에 미치는 영향이 매우 크다고 알려져 있다(Kim *et al.*, 2015).

Table 3. The annual frequency of number of days exceeding 24 hours standard for PM<sub>10</sub> in Pohang.

Year	Jangheung	Jukdo
2001	20	20
2002	38	20
2003	40	36
2004	56	38
2005	67	14
2006	45	19
2007	35	20
2008	32	25
2009	46	7
2010	45	8
2011	44	8
2012	20	1
Mean	41	18
Total	488	216

포항에서의 단기기준 초과일수가 어느 달에 많이 나타나는가를 파악하기 위하여 12년간의 자료를 월별로 정리하여 그림 7에 나타내었다. 월별 히스토그램을 보면 두 지점 모두 3월과 4월에 가장 높은 빈도가 나타나는 것으로 보아 연무와 황사의 영향이 많을 것으로 판단된다. 따라서 단기기준 초과일을 날씨 유형으로 나누어 그 발생빈도를 비교해 보았다(표 4). 장흥동의 경우 황사가 발생한 총일수(91일) 중 단기기준 초과일수(71일)가 78.0%였으며, 다음으로 연무와 박무가 발생한 날의 각각 38.9% 및 14.2%가 단기기준을 초과한 것으로 나타났다. 죽도동의 경우 황사가 발생한 날을 제외하고는 안개 발생이 연무나 박무보다 단기기준을 초과할 확률이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 죽도

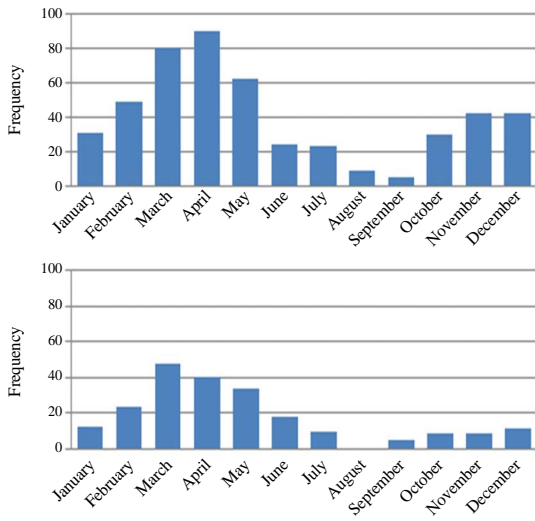


Fig. 7. Monthly variations of the frequency of number of days exceeding 24 hour PM<sub>10</sub> standard in Jangheung (top) and Jukdo (bottom) in Pohang.

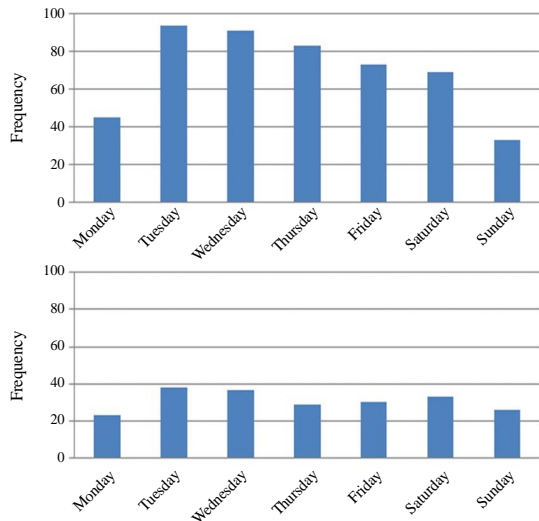


Fig. 8. Weekly variations of the frequency of number of days exceeding 24 hour PM<sub>10</sub> standard in Jangheung (top) and Jukdo (bottom).

Table 4. Number of days exceeding 24 hour PM<sub>10</sub> standard in Pohang by weather type.

Weather type	Jangheung		Jukdo	
Asian dust	71/91	78.0%	50/91	54.9%
Haze	102/262	38.9%	39/262	14.9%
Fog	2/26	7.7%	6/26	23.1%
Mist	158/1113	14.2%	74/1113	6.6%
Clean	155/2446	6.3%	47/2446	1.9%

동이 장흥동보다 해안가에 더 가까이 위치하고 있어 해무로 인한 공기 정체현상이 더 심한 것으로 추정된다.

황사나 강수, 안개, 박무, 연무를 제외한 맑은 날에 대기기준을 초과하는 날은 장흥동이 6.3%, 죽도동이 1.9%로 나타나 날씨에 의한 요인 이외에도 국지적 배출원의 영향으로 고농도가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이를 요일별로 분석해본 결과(그림 8) 죽도동은 요일에 따른 변동이 거의 없는 반면, 장흥동은 일요일이 가장 낮고 화요일에서 토요일이 거의 두 배 이상인 것으로 나타났다. 따라서 공업지역에서는 주중에 가동되는 주변 공장들의 영향이 고농도 발생의 원인이라 판단된다.

### 3.4 강수에 의한 미세먼지 농도 저감효과 분석

대기 중 먼지는 비가 내리면 세정효과로 그 농도가

떨어진다고 알려져 있다(Lim *et al.*, 2013). 강우에 의한 먼지 농도 저감효과를 분석하기 위하여 포항의 12년 동안 전체 자료를 강수일과 비강수일로 구분하여 두 그룹의 자료 분포 양상을 그림 9에 히스토그램으로 나타내었다. 히스토그램을 보면 두 지점 모두 강수일 PM<sub>10</sub> 농도가 확연히 줄어드는 것을 알 수 있다. 비가 오지 않은 날의 PM<sub>10</sub> 평균농도는 장흥동과 죽도동이 각각 73.8 μg/m<sup>3</sup>과 53.5 μg/m<sup>3</sup>이고, 비가 온 날의 평균농도는 각각 60.3 μg/m<sup>3</sup>과 39.2 μg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 두 그룹의 평균농도를 단순 비교해 보면 강수로 인한 PM<sub>10</sub>의 농도가 장흥동의 경우 18.3%, 죽도동은 26.7%의 감소효과가 있다고 말할 수 있다. 이는 기존 연구에서 보고된 강우로 인한 PM<sub>10</sub> 세정효과가 22.3%라는 결과와 매우 유사한 수준임을 알 수 있다(Lim *et al.*, 2012).

2000년에서 2012년 기간 중 포항지역 월별 누적강수량과 두 측정지점의 월평균 PM<sub>10</sub> 농도를 비교한 결과는 그림 10에 나타내었다. 포항지역에서는 장마철인 7월의 누적강수량이 2846 mm로 가장 많았으나 PM<sub>10</sub> 농도는 장흥동의 경우 8월(54.0 μg/m<sup>3</sup>), 죽도동은 9월(32.9 μg/m<sup>3</sup>)에 가장 낮았다. 따라서 상대적으로 누적강수량이 많은 여름철의 PM<sub>10</sub> 농도가 다른 계절에 비하여 감소하는 것을 알 수 있다.



### 3.5 풍향 및 풍속이 미세먼지 농도에 미치는 영향

풍향과 풍속은 오염물질의 물리적인 이동에 대하여 밀접한 관계가 있다고 볼 수 있다(Shin *et al.*, 2007). 표 5에는 12년간 포항지역에서의 일일주풍향의 발생빈도를 나타내었다.

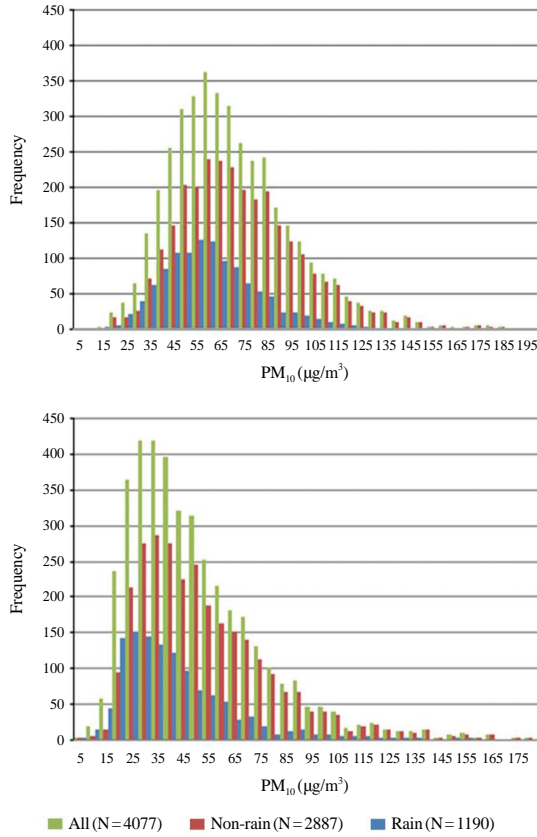


Fig. 9. Histograms for PM<sub>10</sub> data for 12 years at Jukdo-dong (left) and Jangheung-dong (right) according to the precipitation and non-precipitation days.

를 나타내었다. 여기서 일일주풍향이란 하루 중 풍향의 빈도가 가장 많은 방향을 말한다. 그림 11에는 같은 기간 중 포항지역의 시간별 바람장미를 나타내었다. 포항의 주풍향은 육지에서 바다방향인 남서풍이었으며 두 번째로 높은 빈도를 차지하는 바람은 바다에서 불어오는 북동풍이었다. 반면에 남동풍과 북서풍은 빈도가 상당히 낮은 편이었다.

본 연구에서는 풍향에 따른 PM<sub>10</sub> 농도의 변화를 보기 위하여 죽도동과 장흥동 측정지점의 자료를 대상으로 표 5에서 나타난 4개 구역별 평균농도를 계산하였으며 그 결과를 그림 12에 나타내었다. 주거·상업지역에 위치한 죽도동의 경우를 보면, 가장 빈도가 큰 III 방향의 PM<sub>10</sub>의 농도가 55.6 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높았으며 II 방향(포스코 방면)이 50.9 µg/m<sup>3</sup>로 그 뒤를 이었다. 바다에서 불어오는 I 방향이 42.0 µg/m<sup>3</sup>, 산에서 불어오는 IV 방향이 35.9 µg/m<sup>3</sup>로 가장 낮았다.

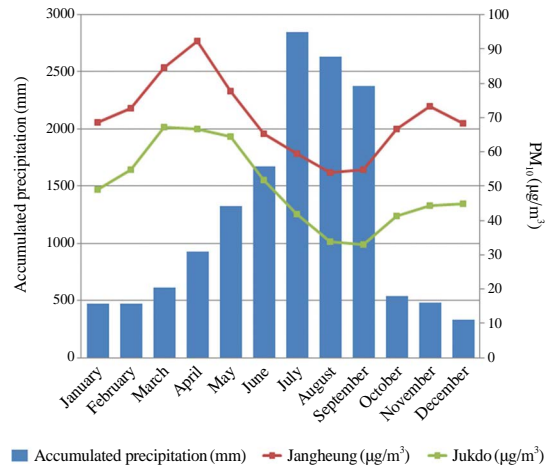


Fig. 10. Average concentrations of PM<sub>10</sub> according to the monthly precipitation.

Table 5. The frequency of prevailing wind directions in Pohang from 2000 to 2012.

Prevailing wind direction	Number of days	Frequency	Division of wind direction
I(N~E)	922	21.0%	
II(E~S)	116	2.6%	
III(S~W)	2558	58.4%	
IV(W~N)	689	15.7%	
Calm	98	2.2%	
Total	4383	100.0%	

공단지역에 위치한 장흥동의 경우, 가장 빈도가 큰 III 방향의 농도가 76.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고 II 방향이 66.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 그 뒤를 이었다. 풍상 측에 포스코가 위치한 I 방향이 60.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, IV 방향이 58.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮게 나타났다. 따라서 장흥동의 경우 측정지점의 남측에 위치한 철강산단의 영향이 이 지점의 먼지 농도에 국지적인 영향을 크게 미치는 것을 알 수 있다.

기상청은 보퍼트(Beaufort)풍력계급에 따라 총 12단계의 풍속을 분류하여 각 계급에는 고요(calm, 0~0.2 m/s), 실바람(light air, 0.3~1.5 m/s), 남실바람(slight

breeze, 1.6~3.3 m/s), 산들바람(gentle breeze, 3.3~5.4 m/s), 건들바람(moderate breeze, 5.5~7.9 m/s) 등과 같이 독특한 우리말로 이름을 붙이고 있다. 본 연구에서는 풍속이 PM<sub>10</sub>의 농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 특이한 경우인 황사와 강수일의 자료를 제외한 보통 상태의 자료만을 사용하였으며, 기상청에서 공급하는 보퍼트풍력계급 표에 의거하여 풍속 등급에 따른 PM<sub>10</sub>의 평균값을 비교·분석하였다. 표 6에 나타난 바와 같이 포항지역의 풍속 범위는 남실바람(1.6~3.3 m/s)의 발생빈도가 전체의 77%를 차지하는 것으로 나타났다. 일반적으로 풍속이 강하면 대기오염물질의 농도는 떨어진다고 알려져 있다. 하지만 장흥동의 경우 풍속이 증가할수록 PM<sub>10</sub> 농도가 올라가는 것으로 나타났다(표 6). 반면에 죽도동의 경우 남실바람이 불 때가 52.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 PM<sub>10</sub> 농도를 보였고 다음으로 산들바람과 실바람 순이었다. 장흥동의 경우 철강산단에 위치하고 있어 약한 바람에 날리지 않는 먼지가 바람이 강해질수록 재비산하여 PM<sub>10</sub>의 농도가 증가할 수 있다고 사료된다(Lee and Kim, 2008). 최근에 춘천

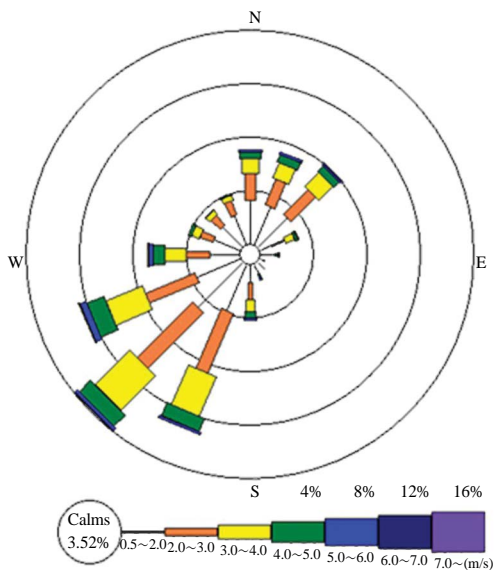


Fig. 11. Wind-rose of Pohang.

Table 6. Comparison of PM<sub>10</sub> data by the Beaufort wind scale.

Range of wind speed (m/s)	PM <sub>10</sub> concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Number of days
	Mean $\pm$ S.D		
	Jangheung	Jukdo	
< 1.5	62.9 $\pm$ 23.9	45.6 $\pm$ 23.3	326 (11%)
1.6~3.3	72.2 $\pm$ 26.6	52.5 $\pm$ 27.2	2344 (77%)
> 3.4	73.5 $\pm$ 29.9	48.3 $\pm$ 28.0	374 (12%)

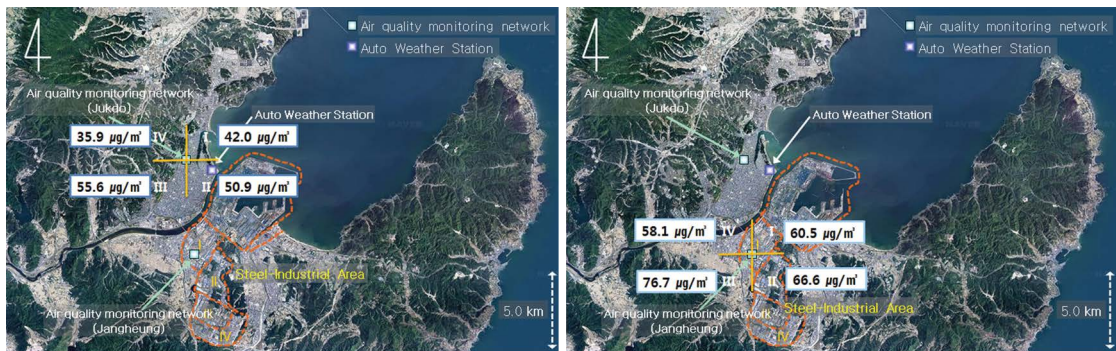


Fig. 12. Average concentrations of PM<sub>10</sub> at Jukdo-dong (left) and Jangheung-dong (right) according to the wind direction.

지역에서의 PM<sub>10</sub> 농도를 풍속에 따라 평가한 연구결과에서도 풍속이 평균수준(약 2m/s) 이상으로 증가할 때 오히려 외부로부터의 이송 등으로 인하여 먼지 농도가 증가한다고 보고된 바 있다(Cho *et al.*, 2016). 주거·상업지역에 위치한 죽도동에서는 이러한 현상이 나타나지 않은 것은 재비산 먼지의 기여도가 장흥동에 비해 상대적으로 적었기 때문일 것으로 추정된다. 그러나 본 연구에서는 풍속과 먼지 자료를 일평균값을 사용하였으므로 만약 시간별 자료에 대하여 평가한다면 이와는 다른 결과가 나올 수도 있다고 사료된다.

#### 4. 결 론

국내 대표적인 철강 산업도시인 포항은 먼지로 인한 대기오염이 항상 우려가 되는 도시 중의 하나이다. 본 연구에서는 2000년 이후 12년간 포항에서 측정된 PM<sub>10</sub> 자료를 대상으로 여러 가지 측면에서의 오염요인을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 포항지역에서는 최근으로 올수록 안개의 발생 빈도는 줄어드는 반면, 연무와 박무의 발생빈도는 상대적으로 늘어나고 있으며, 연무 발생 시의 PM<sub>10</sub> 농도가 황사 발생 시의 다음으로 높게 나타났다. 황사는 3월과 4월에 많이 발생한 반면, 연무는 상대적으로 건조한 가을인 10월과 11월이 가장 많이 발생했고 겨울과 봄에도 상대적으로 높은 발생빈도를 보였다. 따라서 포항지역에서는 연무의 발생요인을 규명하여 이를 제어하는 방안을 강구하는 것은 지역 대기환경관리에서 매우 중요한 요건이라고 사료된다.

둘째, 포항에서의 PM<sub>10</sub> 단기기준 초과일수는 공업지역인 장흥동의 경우 황사가 발생한 총일 수(91일) 중 단기기준 초과일수(71일)가 78.0%였으며, 다음으로 연무와 박무가 발생한 날의 각각 38.9% 및 14.2%가 단기기준을 초과한 것으로 나타났다. 황사나 강수, 안개, 박무, 연무를 제외한 맑은 날에 단기기준을 초과하는 날은 장흥동이 6.3%, 죽도동이 1.9%로 나타나 공업지역에서는 주중에 가동되는 주변 공장들의 영향이 고농도 발생의 원인이라 판단된다. 또한, 포항지역에서는 강수에 의한 먼지 세정효과는 강수일과 비강수일로 구분하여 비교한 결과 장흥동의 경우 18.3%, 죽도동은 26.7%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

셋째, 풍향에 따른 영향을 분석한 결과, 주거·상업지역에 위치한 죽도동에서는 남측에 위치한 철강산단측에서 바람이 불어올 때 농도가 평균 53.3 μg/m<sup>3</sup>인 반면, 특별한 오염원이 없는 북측에서 바람이 불어올 경우는 39.0 μg/m<sup>3</sup>로 낮게 나타났다. 공단지역에 위치한 장흥동의 경우, 남서풍이 불어올 경우 76.7 μg/m<sup>3</sup>로 가장 높았으며, 그 반대 방향인 북동풍이 불어올 경우는 58.1 μg/m<sup>3</sup>로 가장 낮게 나타났다. 따라서 장흥동의 경우 측정지점의 남측에 위치한 철강산단의 영향이 이 지점의 먼지 농도에 국지적인 영향을 크게 미치고 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 풍속에 따른 PM<sub>10</sub> 농도의 영향은 장흥동의 경우 풍속이 증가할수록 PM<sub>10</sub> 농도가 약간 상승하는 것으로 나타났다. 이 지점은 산단지역에 위치하고 있으며 지표면에 침적된 먼지가 바람이 강해질수록 재비산하여 PM<sub>10</sub>의 농도가 증가할 수 있다고 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년 경북녹색환경지원센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

Air Korea (2014) <http://www.airkorea.or.kr/>  
 Bahadur, R., G. Habib, and L.M. Russell (2009) Climatology of PM<sub>2.5</sub> organic carbon concentrations from a review of ground-based atmospheric measurements by evolved gas analysis, *Atmospheric Environment*, 43, 1591-1602.  
 Bäumer, D., B. Vogel, S. Versick, R. Rinke, O. Möhler, and M. Schafer (2008) Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany, *Atmospheric Environment*, 42, 989-998.  
 Berico, M., A. Luciani, and M. Formignani (1997) Atmospheric aerosol in urban area-measurements of TSP and PM<sub>10</sub> standards and pulmonary deposition assessments, *Atmospheric Environment*, 31, 3659-3665.  
 Brunelli, U., V. Piazza, L. Pignato, and S. Vitabile (2007) Two days ahead prediction of daily maximum concen-

- trations of SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, CO in the urban area of Palermo, Italy, *Atmospheric Environment*, 41, 2967-2995.
- Carlton, A.G., J.B. Turpin, W. Johnson, B.T. Buckley, M. Simcik, and S.J. Eisenreich (1999) Methods for characterization of personal aerosol exposures, *Aerosol Science and Technology*, 31, 66-80.
- Cho, S.H., H.W. Kim, Y.J. Han, and W.J. Kim (2016) Characteristics of fine particulates measured in two different functional areas and identification of factors enhancing their concentrations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 100-113. (in Korean with English abstract)
- Heidi, O. (2000) Suspended particulate matter in indoor air: adjuvants and allergen carriers, *Toxicology*, 152, 53-68.
- Hwang, Y.J., S.J. Lee, H.S. Do, Y.K. Lee, T.J. Son, T.G. Kwon, J.W. Han, D.H. Kang, and J.W. Kim (2009) The Analysis of PM<sub>10</sub> Concentration and the Evaluation of Influences by Meteorological Factors in Ambient Air of Daegu Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(5), 459-471. (in Korean with English abstract)
- Jo, H.Y. and C.H. Kim (2011) Characteristics of air quality over Korean urban area due to the long-range transport haze events, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(1), 73-86. (in Korean with English abstract)
- Kim, C.H., I.S. Park, S.J. Lee, J.S. Kim, H.A. Jin, and H.G. Sung (2004) On the Recent Air Pollution Levels Observed in the Regional Air Monitoring Network - High Air Pollution Concentration Episodes and Their Meteorological Characteristics in 2002, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(2), 215-224. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.A., H.A. Jin, and C.H. Kim (2007) Characteristics of Time Variations of PM<sub>10</sub> Concentrations in Busan and Interpreting Its Generation Mechanism Using Meteorological Variables, *Journal of Environmental Science International*, 16(10), 1157-1167. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.H., E. Kabir, and S. Kabir (2015) A review on the human health impact of airborne particulate matter, *Environment International*, 74, 136-143.
- Laakso, L., T. Hussein, P. Aarnio, M. Kpompulla, V. Hiltunen, Y. Viisanen, and M. Kulumala (2003) Diurnal and annual characteristics of particle mass and number in urban, rural and arctic environment in Finland, *Atmospheric Environment*, 37, 2629-2641.
- Lee, J.J. and C.H. Kim (2008) Characteristics of Recent Occurrence Frequency of Asian dust over the Source Regions - Analysis of the dust Occurrences since 2002, *Korean Meteorological Society*, 18(4), 493-506. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.M., H.S. Jo, and H.J. Lim (2009) A Study on the Seasonal Characteristics of Ions and Airmass Influence in Fine Particles in Daegu, *Proceeding of Korean Society for Atmospheric Environment*, 104-106. (in Korean with English abstract)
- Lim, D.Y., T.J. Lee, and D.S. Kim (2012) Quantitative Estimation of Precipitation Scavenging and Wind Dispersion Contributions for PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> Using Long-term Air and Weather Monitoring Database during 2000~2009 in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 325-347. (in Korean with English abstract)
- Lim, D.Y., T.J. Lee, and D.S. Kim (2013) Development and Validation Test of Effective Wet Scavenging Contribution Regression Models Using Long-term Air Monitoring and Weather Database, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29, 297-306. (in Korean with English abstract)
- Lim, J.Y., Y.S. Chun, K.M. Cho, S.S. Lee, and H.J. Shin (2004) The Meteorological, Physical, and Chemical Characteristics of Aerosol during Haze Event in May 2003, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(5), 697-711. (in Korean with English abstract)
- NIER (2011) Annual report of air quality in Korea 2011, National Institute of Environmental Research (NIER) of MOE, 444 pp.
- Park, J.W., Y.H. Lim, S.Y. Kyung, C.H. An, S.P. Lee, S.H. Jeong, and Y.S. Ju (2003) Effects of Ambient Particulate Matter (PM<sub>10</sub>) on Peak Expiratory Flow and Respiratory Symptoms in Subjects with Bronchial Asthma During Yellow Sand Period, *Journal of Tuberculosis and Respiratory Diseases*, 55(6), 570-578. (in Korean with English abstract)
- Pohang Weather Station (2014) <http://www.kma.go.kr/weather/observation/>
- Pope, C.A., D.V. Bates, and M.E. Raizenne (1995) Health effects of particulate air pollution: time for reassessment, *Environmental Health Perspectives*, 103(5), 472-480.
- Shin, M.K., C.D. Lee, H.S. Ha, C.S. Choe, and Y.H. Kim (2007) The Influence of Meteorological Factors on

- PM<sub>10</sub> Concentration in Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(3), 322-331. (in Korean with English abstract)
- Song, S.K. and Z.H. Shon (2008) Analysis of Chemical and Meteorological Effects on the Concentration Difference of Photochemical Air Pollutants between Coastal and Inland Regions in Busan, *Journal of Environmental Science International*, 17(10), 1169-1182. (in Korean with English abstract)
- Wojdyr, M. (2010) Fityk: a general-purpose peak fitting program, *Journal of Applied Crystallography*, 43, 1126-1128.
- Won, S.R., Y.J. Choi, A.R. Kim, S.H. Choi, Y.S. Kim, and C.H. Kang (2008) Ionic Compositions of Particulate Matter in Yong-in in Spring and November, *Proceeding of Korean Society for Atmospheric Environment*, 175-176.