

기상인자가 미세먼지 농도에 미치는 영향

The Influence of Meteorological Factors on PM₁₀ Concentration in Incheon

신문기* · 이충대 · 하현섭 · 최춘석 · 김용희
인천광역시보건환경연구원
(2007년 2월 7일 접수, 2007년 5월 9일 채택)

Moon-Khee Shin*, Choong-Dae Lee, Hyun-Sup Ha,
Choon-Suck Choe and Yong-Hee Kim
Incheon Research Institute of Public Health and Environment
(Received 7 February 2007, accepted 9 May 2007)

Abstract

In this study, we have analyzed PM₁₀ concentration measured at Incheon Regional Air Monitoring Network (10 stations) and meteorological data at Incheon Weather Station to investigate factors (i.e. wind direction, wind speed, relative humidity, major meteorological phenomenon, and sea-land breezes existence) influencing PM₁₀ concentration in Incheon during 2005. Statistical differences among meteorological factors were assessed by Kruskal-Wallis test or Mann-Whitney U test.

The main conditions causing high PM₁₀ concentration are summarized below;

1. When westerly wind prevailed (however, PM₁₀ decreased when winds were blowing from the east or north).
2. When the winds were calm, owing to accumulation of nearby emissions under stagnant conditions, or when the wind speed is in excess of 6 m/s, which shows the effect of fugitive dust produced by wind erosion.
3. Under the condition of high relative humidity and poor diffusion based on meteorological phenomenon such as fog, mist, and haze.
4. When the Sea-Land breezes existed, which occurred 70 days in Incheon during 2005 and contributed significantly to high PM₁₀ concentration in the coastal urban area.

In conclusion, we have found that the meteorological factors have influence on PM₁₀ concentration in Incheon.

Key words : PM₁₀, Meteorological factors, Sea-land breezes, Weather conditions

1. 서 론

인천은 1991년 9월부터 청정연료 등의 사용에 관

한 고시에 의거 업무용 시설 및 공동주택에 대하여 LNG 및 경유 사용을 점차적으로 의무화하기 시작하였고, 1997년 7월 대기환경규제지역으로 지정된 이후 고체연료 사용 규제, 저공해 자동차 보급 등 각종 대기오염 저감정책을 추진하고 있다. 이로 인해 아황산가스, 일산화탄소 농도는 개선되는 추세이나, 자동

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-440-5475, E-mail : mkshin@korea.kr

차의 급속한 증가 및 산업활동의 영향으로 이산화질소, 미세먼지, 오존 오염도는 증가추세에 있다. 현재 공업단지(7개소), 인천항, 수도권 매립지, 인천국제공항 등의 대규모 오염 발생원과 각종 개발사업 등으로 대기환경 여건이 불리하며, 인천지역 내에 주 오염원인 공단지역이 주거지역과 혼재되어 지역주민의 체감환경 오염도를 가중시키고 있다. 특히 오염원이 남동공단, 인천항 등과 같이 연안지역에 위치하고 있고, 해륙풍 등의 국지풍과 관련하여 복잡한 대기 흐름이 나타나고 있는 신흥, 만석, 송의, 송도와 같은 연안지역의 대기오염도가 높게 측정되고 있다.

맑고 깨끗한 대기환경을 유지하여 시민의 건강을 보호하고, 아울러 대기오염으로 인한 환경상의 위험을 예방하기 위해서는 오염발생원의 과학적 관리와 도시대기오염의 생성 메커니즘을 규명하는 것이 필수적이다. 더욱이 기상인자는 오염물질의 대기 중 수송, 확산, 농축에 영향을 미치게 되므로 매우 중요시되고 있다. 박일수 등(1991)은 겨울철 SO₂ 농도에 영향을 미치는 기상인자로 기온, 풍속, 강수량, 혼합고,

기압배치를 설정하고 영향을 살펴보았으며, 신찬기 등(1992)은 도심의 대기오염 농도와 기상인자들과의 관련성을 통계분석하고 수식화 하였다. 정현준 등(1999)은 교통량이 많고 오존농도가 높은 도심지역의 오존농도와 기상인자간의 관련성을 분석하였고, 이화운 등(1999)은 계절별 NO₂ 농도와 기상인자와의 상관관계를 살펴보았다. 변화된 시대 여건에 의해 현재 도시대기질의 지표로 미세먼지에 관심이 집중되고 있으며, 따라서 본 연구에서는 인천지역 PM₁₀ 농도에 영향을 미치는 기상인자인 풍향, 풍속, 상대습도, 일기 유형, 해륙풍 유무 등을 살펴봄으로써 미세먼지로 인한 대기오염 현상의 주요원인을 분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 조사기간 및 대상지역

본 연구는 2005년 1월부터 12월까지 인천에 설치

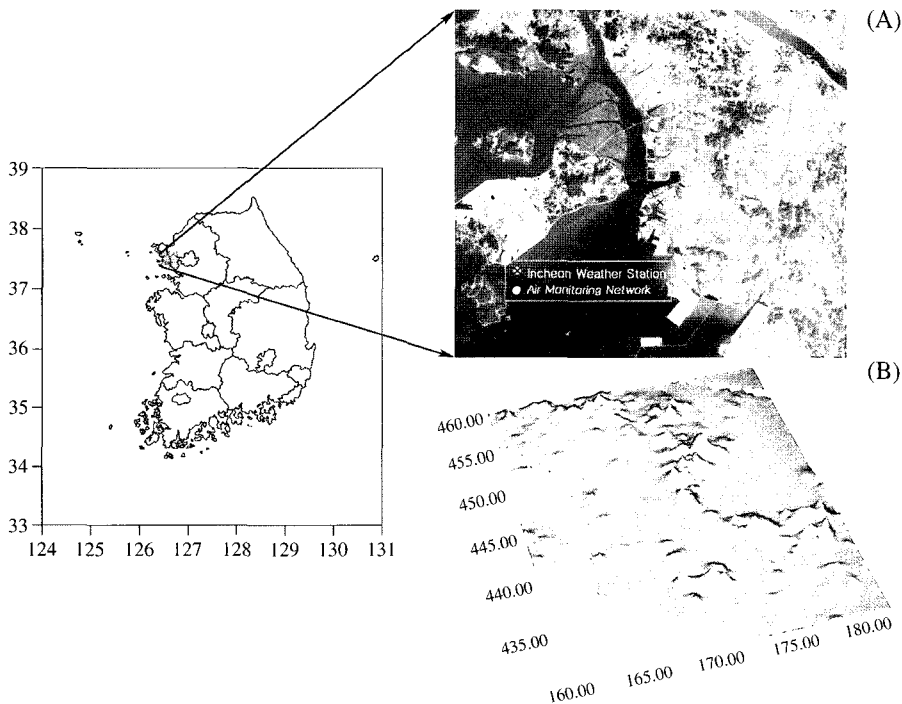


Fig. 1. (A) Location of air monitoring sites in Incheon and Incheon Weather Station. (B) 3D terrain Map (Incheon Metropolitan City, 2000).

된 도시대기측정망과 인천기상대 자료를 중심으로 실시하였다. 그림 1(A)는 2005년 말 기준 인천의 도시대기측정망과 인천기상대의 위치를 나타내고 있다. 도시대기 측정망은 주거지역 4개소, 상업 지역 5개소, 공업지역 2개소, 농림지역 1개소 등 총 12개 측정소로 구성되어 있으며, 주로 관공서 옥상에 설치되어 있다.

기상자료는 인천기상대 AWS 자료를 사용하였으며 관측환경은 다음과 같다. 인천기상대는 인천 자유공원

정상에 위치하여 주변에 관측 장애물이 없고, 서쪽으로는 서해바다가 위치하고 동쪽으로는 인천시내가 있어서 지리적으로 인천의 기상을 대표하는 관측 지점으로서 위도 37° 28' 28.904"N, 경도 126° 37' 35.94"E에 위치하고 있으며, 해발고도는 68.85 m이다(인천기상대, 2006).

그림 1(B)는 인천지역의 3차원 지형도이다. 인천은 표고 50 m 이하가 87.7%로 대부분 저지대로 이루어졌으며, 경사도 20% 미만이 89.3%로 대체적으로 완

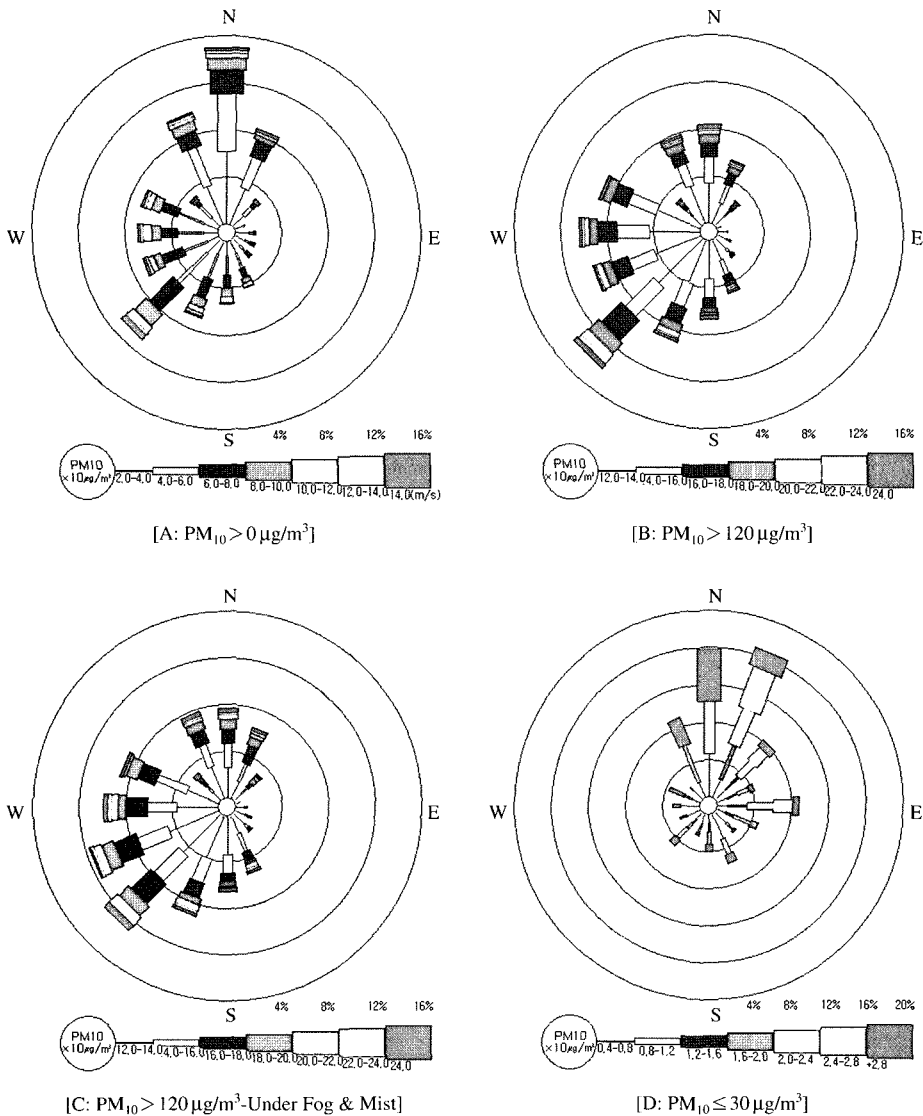


Fig. 2. Comparison of PM_{10} pollution roses by concentration interval in Incheon, 2005.

만한 지형을 형성하고 있다(인천광역시, 2000).

2.2 조사 내용

전체 도시대기측정소 12개소 중 구월과 송해 측정소를 제외한 10개소의 PM₁₀ 자료를 이용하였다. 구월 측정소 자료는 주변 환경변화로 인해 대기 질 대표성 확보에 어려움이 있었고, 송해 측정소는 강화군에 위치하여 인천 도심 대기오염도와 연계성 부족으로 제외하였다. PM₁₀ 통계자료의 신뢰성 제고를 위하여 통계처리시 대상기간 중 75% 이상의 측정(통계)자료가 확보된 경우에만 유효자료로 인정하였고, 측정소 신설 및 측정기기교체로 인한 시험기동기간은 제외하였다. 상대습도의 경우 인천기상대 측정자료의 일부 결측에 따라 인천시 도시대기측정망 측정자료의 산술평균치를 이용하였다.

이들 자료를 이용하여 풍향, 풍속, 습도, 일기유형, 해륙풍 등이 PM₁₀ 농도에 미치는 영향을 살펴보았다.

2.3 통계 분석

각 기상인자 변화에 따른 PM₁₀ 평균농도의 비교 및 유의성 검증을 위해 SPSS Ver. 10.0을 이용하여 통계 처리하였다. 풍향, 풍속, 습도, 일기유형별 PM₁₀ 농도 분석은 Kruskal-Wallis test를 실시하였으며, 해풍 유무일의 PM₁₀ 평균 차이는 Mann-Whitney U test를 이용하여 검증하였다. 모든 통계의 유의수준은 α=.05로 설정하였다.

3. 기상 인자별 PM₁₀ 농도 분석

3.1 풍향

2005년 황사를 제외한 기간의 도시대기측정망 PM₁₀ 시간평균 자료와 인천기상대 풍향자료를 이용하여 PM₁₀ 오염장미를 살펴보았다(그림 2). A는 전체농도 구간에서의 오염장미로서 북풍(15.21%)과 남서풍(11.02%)의 빈도가 가장 높게 분석되었다. 북풍계열의 경우 60 µg/m³ 미만의 저 농도 비율이 높게 나타난 반면, 서풍계열은 60 µg/m³ 이상의 고농도 비율이 상대적으로 높게 나타났다. 오염장미 B, 120 µg/m³를 초과하는 고농도 PM₁₀의 경우 서풍계열(남서풍 14.25%, 서풍 10.73%, 서남서 9.89% 등)의 발생빈도가 상당히 높게 나타났으며 인천의 지형적 특

성을 고려할 때 해풍(sea breeze)의 영향이 큰 것으로 판단된다. 높은 습도와 대기정체현상의 영향을 많이 받는 안개·박무(PM₁₀ 120 µg/m³ 초과)시의 오염장미(C)를 살펴보면 앞서 설명한 오염장미(B)와 상당히 유사한 형태로 나타났다. 이는 고농도 미세먼지의 경우 안개·박무 등의 기상 현상이 주를 이루고 있으며, 서풍계열의 영향을 가장 많이 받는 것으로 판단된다. 30 µg/m³ 이하의 저농도 PM₁₀의 오염장미(D)의 경우 북북동풍(16.84%), 북풍(15.99%), 북북서풍(9.15%), 동풍(9.03%), 북동풍(8.30%)순으로 주로 북풍과 동풍계열의 빈도가 높았다. 북풍과 북북서풍의 경우 오염장미(A)와 비교 시 큰 차이가 없지만, 북북동풍, 동풍, 북동풍 등의 동풍 계열 비율은 1.8~4.1배 상승한 것으로 분석되었다.

PM₁₀ 농도구간 별 풍향 빈도를 전체농도(0 µg/m³ 초과), 30 µg/m³ 이하, 120 µg/m³ 초과, 200 µg/m³ 초과로 구분해서 살펴보았다(그림 3). 30 µg/m³ 이하를 저농도 구간, 120 µg/m³과 200 µg/m³ 초과를 고농도로 구분하였을 때 저 농도의 빈도가 높은 풍향은 북북동, 북동, 동북동, 동, 동남동, 북북서, 북풍이었으며, 고농도의 빈도가 높은 구간은 무풍(Calm), 남남동, 남, 남남서, 남서, 서남서, 서풍으로 분석되며, 남동풍과 북서풍은 농도구간별 큰 차이가 없고, 북북서풍은 120 µg/m³ 초과빈도는 높으나 200 µg/m³ 초과빈도는 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 이중 북풍이 30 µg/m³ 이하 구간에서 가장 높은 빈도를 보였으며, 남

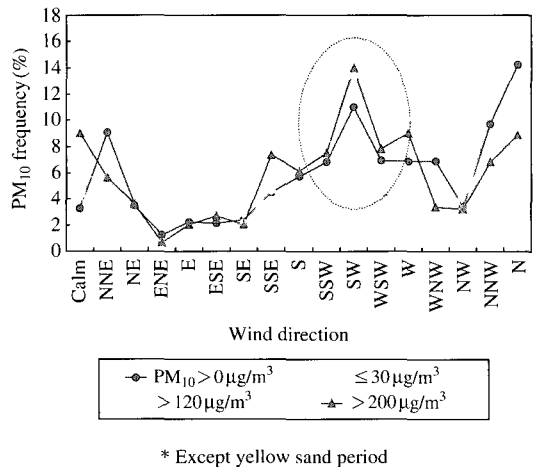
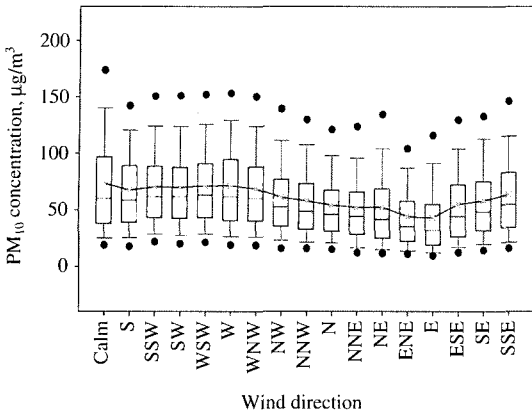


Fig. 3. Comparison of wind direction frequency by PM₁₀ concentration interval in Incheon, 2005.



* Except yellow sand period

Fig. 4. Variation of PM₁₀ concentration by wind direction in Incheon, 2005.

Table 1. PM₁₀ concentration by wind direction in Incheon, 2005.

WD	N	Mean (µg/m ³)	S.D. (µg/m ³)
Calm	1,998	73.6	48.6
S	3,468	67.7	40.8
SSW	4,129	70.6	40.4
SW	6,631	70.1	40.8
WSW	4,201	71.4	40.4
W	4,164	71.6	42.9
WNW	4,146	68.7	39.9
NW	2,047	61.4	39.4
NNW	5,854	58.0	37.6
N	8,589	54.3	35.2
NNE	5,467	52.3	36.6
NE	2,104	52.4	40.1
ENE	770	44.0	32.9
E	1,363	43.2	36.2
ESE	1,296	54.9	40.7
SE	1,433	58.4	38.9
SSE	2,698	64.1	42.9

* Except yellow sand period

서풍이 120 µg/m³ 및 200 µg/m³ 초과구간에서 발생빈도가 가장 높게 분석되었다.

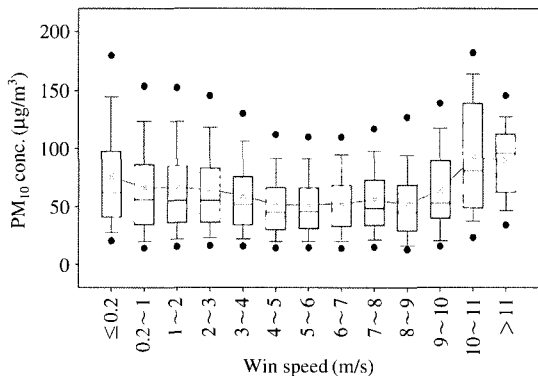
각 풍향별 시간평균 PM₁₀ 농도분포는 그림 4, 표 1과 같으며, 박스그래프는 아래로부터 5-, 10-, 25-, median, 75-, 90-, 95-percentile을 나타내고 있다(황사기간 제외). 바람이 없는 무풍(0.2 m/s 이하)일 때 73.6 µg/m³으로 평균이 가장 높았으며, 서>서남서>

남남서>남서>서북서풍 순으로 높은 농도를 보였다. 반면 동풍 43.2 µg/m³, 동북동풍 44.0 µg/m³, 북북동풍 52.3 µg/m³, 북동풍 52.4 µg/m³으로 낮은 농도를 보였다. 주로 무풍 상태와 서풍계열의 바람이 불 때 높은 농도분포를 보였으며, 동풍계열의 바람이 불 때 낮은 농도분포와 빈도를 나타내었다. 풍향별 PM₁₀ 농도차의 유의성을 검증하기 위하여 Kruskal-Wallis test를 실시한 결과 p<.001 수준에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

3.2 풍속

풍속별 PM₁₀ 농도분포를 그림 5와 같이 살펴보았다. 풍속별 미세먼지 농도는 10~11 m/s 구간에서 92.4±49.2 µg/m³ (n=49)로 가장 높고, 4~5 m/s시 51.5±31.2 µg/m³ (n=7,268) 및 5~6 m/s 구간에서 51.6±30.1 µg/m³ (n=3,551)로 낮은 농도분포를 보였다.

전체 풍속 구간별 PM₁₀ 농도 추이를 분석한 결과, 0~6 m/s 구간은 무풍(Calm)시 75.9±50.3 µg/m³ (n=2,172)로 가장 높은 농도를 보였으며 풍속이 증가함에 따라 미세먼지 농도가 점차 감소하는 특성을 보였다. 이는 풍속이 증가함에 따라 대기환기량이 증가한 영향으로 판단된다. 반면 6 m/s를 초과하는 구간에서는 풍속이 증가함에 따라 미세먼지 농도가 상승하였으며, 특히 10 m/s를 초과하였을 때 PM₁₀ 농도는 90 µg/m³ 이상으로 9~10 m/s 구간에 비해 약 50% 오염도가 증가하였다. 그러나 다행히 인천의 시간



* Except yellow sand period

Fig. 5. Variation of PM₁₀ concentration by wind speed in Incheon, 2005.

평균풍속이 10 m/s를 초과하는 경우는 2005년 기준 총 9시간(0.1%) 발생하여 빈도가 낮은 특이현상으로 분석된다. 이러한 농도 경향은 지면에 침강하였던 먼지가 대기 유동에 실려 재 비산되어 난류확산(turbulent diffusion)함으로써 PM₁₀ 농도가 상승(Watson and Chow, 2000)한 것으로 판단되며, Chow and Watson (1997)이 Las Vegas (NV)에서 풍속 구간에 따른 미세먼지 변화를 살펴본 결과(시간평균풍속 4~5 m/s부터 PM₁₀ 농도 상승, 10 m/s 초과 시 PM₁₀ 농도 급증)와 경향이 유사하였다.

풍속구간별 PM₁₀ 농도는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 검증되었다($p < .001$, Kruskal-Wallis test).

3.3 일기 유형

인천기상대 지상실험표 자료를 이용하여 일기 유형별 시간평균 미세먼지 농도분포를 그림 6, 표 2와 같이 분석하였다. 황사 시 평균 196.0 µg/m³으로 가

Table 2. PM₁₀ concentration by weather conditions in Incheon, 2005.

Weather condition	N	Mean (µg/m ³)	S.D. (µg/m ³)
Clear	18,666	54.0	31.0
Cloud	19,591	51.2	30.4
Rain	6,557	50.6	34.7
Snow	791	53.1	38.2
Mist	13,583	92.3	47.2
Fog	955	114.1	54.5
Haze	140	117.4	40.2
Yellow sand	875	196.0	113.4

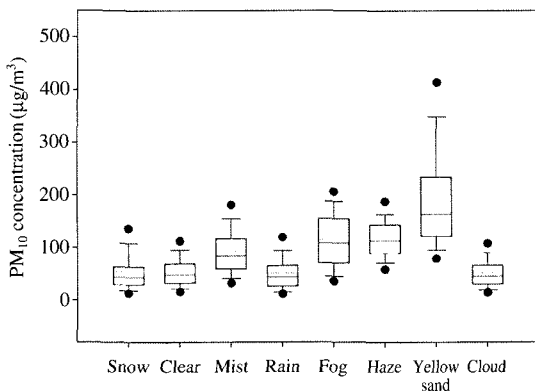


Fig. 6. Comparison of PM₁₀ concentration by weather conditions in Incheon, 2005.

장 높은 농도를 보였으며, 강우 시 50.6 µg/m³으로 가장 낮게 분석되었다. 이외의 기상조건에서는 53.1~117.4 µg/m³의 평균 농도를 나타내었다. 황사 이외에 연무·안개·박무 시에도 평균 90 µg/m³ 이상의 고농도 PM₁₀이 발생하는 것으로 조사되었다. 일기유형별 PM₁₀ 농도차의 유의성을 검증하기 위하여 Kruskal-Wallis test를 실시한 결과 $p < .001$ 수준에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

2005년 황사를 제외한 기간의 PM₁₀ 농도별 일기 유형 빈도를 0, 120, 200 µg/m³ 초과로 구분해서 살펴

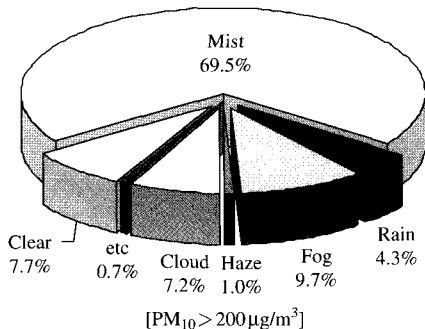
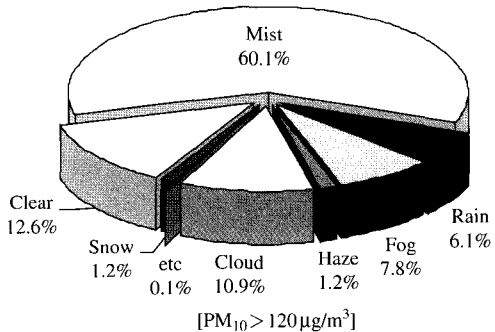
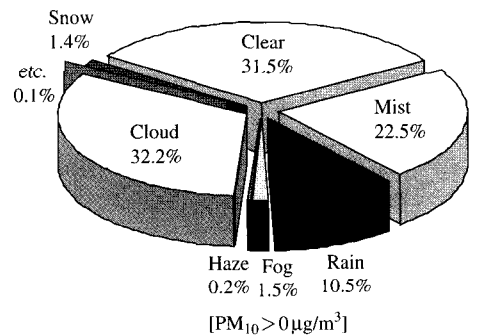


Fig. 7. The distribution of weather conditions except yellow sand period in Incheon, 2005.

보았다(그림 7). PM₁₀ 농도가 상승할수록 일반적인 기상(맑음, 흐림, 비)의 빈도는 낮아지고, 박무·안개·연무 등의 대기정체와 관련된 기상빈도가 상승하였다. 특히 박무의 경우 PM₁₀ 농도가 200 µg/m³를 초과하였을 시 69.5%로 가장 높은 비율을 나타내었으며, 0 µg/m³를 초과하는 구간의 약 3배로 분석되었다.

3. 4 상대습도

상대습도 별 PM₁₀ 농도 분포를 그림 8, 표 3과 같이 살펴보았다.

전체 기상조건에서는 습도 40~50% 구간이 PM₁₀ 평균 54.6 µg/m³으로 가장 낮은 농도를 보였으며, 70~80% 구간에서 69.8 µg/m³으로 가장 높게 분석되었다. 전 구간 추이는 상대습도가 20% 미만일 때 66.0 µg/m³으로 다소 높고, 점차 낮아졌다가 50~80% 구간에서 다시 상승하였다. 또한 80% 이상의 구간에서는 PM₁₀ 농도가 낮아지는 경향을 보이는데 이는 강우에 의한 세정효과(Wash out)로 판단된다.

강우와 황사에 의한 영향을 배제한 결과, 상대습도 20% 미만 구간을 제외하고 전반적으로 상대습도가 높아질수록 PM₁₀ 농도가 상승하는 추이를 보이고 있으며, 이러한 증가율은 상대습도 40%부터 10%씩 습도가 증가할 때마다 미세먼지 농도는 평균 4.3 µg/m³(6.7%) 상승한 것으로 분석되어진다. 상대습도 구간별 PM₁₀ 농도는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 검증되었다($p < .001$, Kruskal-Wallis test).

4. 해풍에 따른 PM₁₀ 농도 특성

4. 1 해풍의 정의 및 특성

해안지역에서는 육지와 해양간의 열적 성질 차이로 인해 국지적 기압 분포의 일변화가 나타나고, 그 결과로 낮에는 해풍(sea breeze) 그리고 밤에는 육풍(land breeze)이 발달한다. 해풍은 바람이 약하고, 맑은 여름철에 잘 관측되는데, 정오 전에 발달하기 시

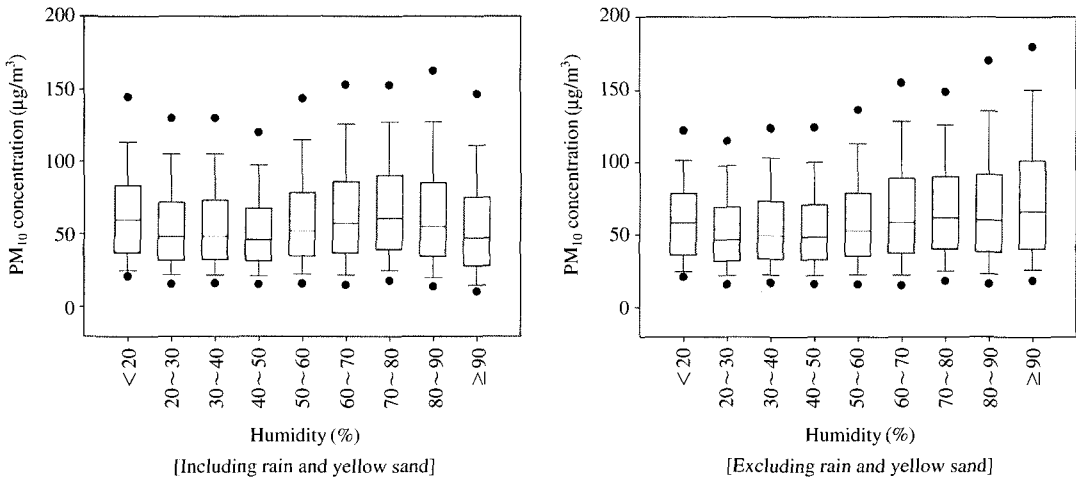


Fig. 8. Variation of PM₁₀ concentration by relative humidity in Incheon, 2005.

Table 3. PM₁₀ concentration by relative humidity in Incheon, 2005.

Condition	RH (%)	<20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	≥90
Including rain and yellow sand	N	467	3,425	7,552	11,123	13,017	13,749	14,380	13,078	2,881
	Mean (µg/m ³)	66.0	58.5	58.4	54.6	63.6	67.5	69.8	66.9	57.4
	S.D. (µg/m ³)	39.9	41.5	40.6	35.9	49.6	45.3	42.1	48.0	41.4
Excluding rain and yellow sand	N	447	3,021	5,997	8,182	9,631	9,873	9,044	6,873	733
	Mean (µg/m ³)	61.1	54.3	57.3	56.1	61.4	68.3	69.6	71.5	77.4
	S.D. (µg/m ³)	31.4	33.4	34.5	34.2	37.8	44.9	41.0	48.5	48.7

작하여 오후 중반에 가장 강하게 나타난다. 해풍의 가장 전면(내륙 쪽)에서는 해풍을 이루는 비교적 찬공기와 육지의 따뜻한 공기 사이에서 전선면이 뚜렷하게 발생하는 경우가 있는데, 해풍이 급격히 약해지는 이 수렴 구역을 해풍전선(sea breeze front)이라고 한다(민경덕 등, 2005).

연안지역에 위치한 대도시의 경우 공단지역의 대부분이 연안 부근에 집중되어 있기 때문에, 이들 오염원으로부터 배출된 오염 공기는 야간의 육풍에 의해 해상으로 수송된 후, 다시 주간(의 해풍에 의해 육상으로 이류 되는 경향이 있다. 이런 경우에 일반풍이 약하면, 오염 대기는 해안선 부근에 체류되는 이른바 체류 오염의 효과가 현저해지는 관계로 연안역에서의 대기오염농도는 내륙보다도 높은 상태가 된다(김유근 등, 1996). 또한 일반적으로 해풍이 발생할 때는 기압경도가 완만해서 대기가 안정하고 역전층 고도가 낮으며, 대기의 확산 능력은 작아진다(임윤규 등, 2005).

해풍의 형성과 발달은 종관기상조건과 밀접한 관련을 가지게 되는데, 특히 종관류가 해풍과 반대기류(offshore flow)일 때 해풍의 지연이 발생하며, 해풍전선은 강하게 발달하게 된다. 또한 종관풍의 역할은 해풍현상이 탁월한 연안지역의 오염물질의 이류 및 확산에 영향을 미치게 되는데, 종관류가 해풍을 지연시켜 오염물질의 내륙 침투를 억제하는 반면 대기상층의 해풍반류와 결합하여 해안지역으로 오염물질이 재 이류 되는 것으로 알려져 있다(오인보 등, 2004).

4.2 해풍일 선정

해풍의 발생 및 지연과 관련하여 PM₁₀ 농도 변화를 살펴보기 위해 해풍일을 선정하였다. 해풍일 선정은 기존의 선행연구(오인보 등, 2004)를 참고로 하였으며 그 기준은 다음과 같다. 우선 오후(1300~1800 LST)의 정시 풍향이 4시간 이상 남남서~서북서풍(202.5~292.5°)이 나타나고, 평균 풍속이 2~5 m/s 구간에 포함되는 조건이다. 풍향의 경우 인천의 해안과 지형을 고려하였으며, 풍속구간의 경우 전형적인 해풍의 풍속범위와 종관풍의 영향을 최대한 배제시키고자 한 것이다. 또한 해륙풍 반전에 의한 오전(0600~0900 LST)의 저 풍속 현상(평균풍속 2 m/s 이하)을 고려하였고, 강수일과 운량이 9 이상 흐린 날은 제외하였다.

4.3 해풍일 선정 결과 및 분석

해풍일 선정 결과 2005년 1~12월간 총 70일로 2005년도 전체일수의 19.2%로 분석되었다(표 4). 평균 기온과 일사량이 높은 5~7월의 발생일수는 총 25일로 전체 발생일수의 35.7%로 나타났으며, 해풍 발달에 방해가 되는 종관류가 가장 약한 10~11월(2005년 10~11월 평균 지상풍속 1.7 m/s)이 18일(25.7%)로 높은 빈도를 보였다.

해풍일과 비 해풍일의 PM₁₀ 시간 평균농도 분포는 그림 9와 같다(황사기간 제외). 해풍일 평균 PM₁₀ 농도는 71.5±41.8 µg/m³ (n=11,010)으로 비 해풍일 60.5±39.8 µg/m³ (n=48,949)에 비해 오염도가 18.2% 상승하였으며, p<.001 수준에서 통계적으로 유의

Table 4. Number of days in Sea-Land breezes by month in Incheon, 2005. unit: day (%)

Month	Number of days
Jan.	6(8.6)
Feb.	4(5.7)
Mar.	3(4.3)
Apr.	3(4.3)
May	10(14.3)
Jun.	8(11.4)
Jul.	7(10.0)
Aug.	5(7.1)
Sep.	6(8.6)
Oct.	11(15.7)
Nov.	7(10.0)
Dec.	0(0.0)
Total	70(100)

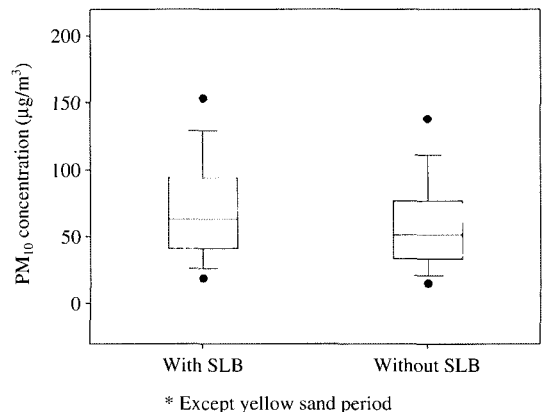
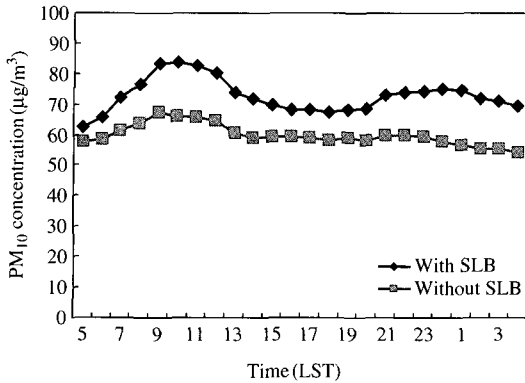
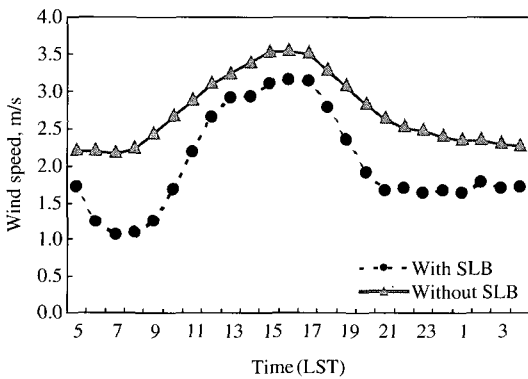


Fig. 9. Comparison of PM₁₀ concentration with and without SLB (Sea-Land breezes) in Incheon, 2005.



* Except yellow sand period

Fig. 10. Comparison of hourly PM₁₀ concentration trends with and without SLB (Sea-Land breezes) in Incheon, 2005.



* Except yellow sand period

Fig. 11. Comparison of hourly wind speed trends with and without SLB (Sea-Land breezes) in Incheon, 2005.

한 차이가 있는 것으로 나타났다(Mann-Whitney test).

해풍이 발달하기 시작하는 0500 LST부터 익일 0400 LST까지 24시간 동안 해풍 유무별 PM₁₀ 농도 변화를 그림 10, 풍속 변화를 그림 11과 같이 살펴보았다(황사기간 제외). 해풍이 발달한 날은 전체 시간대에서 비 해풍일에 비해 PM₁₀ 농도가 높게 나타났으며, 일출·일몰 후 해륙풍 지연에 의한 저풍속 현상과 함께 PM₁₀ 농도 상승이 있는 것으로 분석되어진다. 0500 LST에는 해풍일 62.8 ± 35.7 µg/m³ (n=627), 비 해풍일 57.9 ± 41.9 µg/m³ (n=2,719)로 4.9

µg/m³의 차이를 보였으나, 시간이 경과함에 따라 농도차가 크게 벌어졌으며, 최대 peak는 1000 LST로 해풍일 83.8 ± 50.0 µg/m³ (n=586), 비 해풍일 66.4 ± 40.5 µg/m³ (n=2,620)으로 해풍의 영향을 받았을 때가 17.4 µg/m³, 26.1% 더 높은 농도를 나타내었다. 오후 지상 풍속이 증가함에 따라 PM₁₀ 농도는 해풍일 비 해풍일 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 2000 LST 이후 해풍일은 2 m/s 이하의 낮은 풍속이 익일 0400 LST까지 유지되었으며, 비 해풍일과 달리 PM₁₀ 농도가 2100 LST부터 익일 0100 LST까지 73.0~75.0 µg/m³로 높게 유지되는 2차 peak가 발생하였다.

이러한 연구 결과는 전병일 등(1994)이 해풍이 부산 지역의 대기오염 농도에 미치는 영향을 규명한 결과 (SO₂ 24.4%, TSP 31.5%, O₃ 8.0%, NO₂ 26.7%, CO 15.7% 상승, 야간 및 새벽시간 대기오염도 상승)와 상당부분 일치하였다.

5. 결 론

인천에 설치된 도시대기측정망과 인천기상대 자료를 이용하여 PM₁₀ 농도에 영향을 미치는 기상인자(풍향, 풍속, 상대습도, 일기유형, 해륙풍 유무)를 살펴 보았다.

분석 결과 서풍계열 바람이 불 때 동풍계열보다 PM₁₀ 농도가 높게 나타났다. 이는 대규모 오염원이 인천의 서쪽인 연안에 위치하고 있어 서풍계열 바람이 불 때 연안지역에서 발생한 오염물질이 내륙으로 수송된 영향과 해풍이 지연되었을 때 저풍속 현상으로 인해 대기환기량이 감소하여 오염물질 확산에 불리한 조건이 형성된 것으로 판단된다. 또한 우리나라는 편서풍 지대에 위치하고 있어 인접국인 중국에서 발생하는 대기오염물질이 장거리 수송되어 국내에 영향을 준 것으로 고려된다.

지상풍속 구간별 시간평균 PM₁₀ 농도 추이를 분석한 결과, 0~6 m/s 구간은 바람이 없는 무풍(Calm)시 가장 높은 농도를 보였으며 풍속이 증가함에 따라 미세먼지 농도가 점차 감소하는 추이를 보였다. 지상 풍속이 6 m/s를 초과하는 구간에서는 먼지의 재비산으로 인해 풍속이 증가함에 따라 미세먼지 농도는 상승하였으나 이는 연중 4% 이하의 낮은 빈도를 보이는 특이현상으로 분석된다. 인천에 유해한 호흡성

본진으로 관심이 집중되고 있는 PM_{2.5}는 공기역학적 직경이 PM₁₀보다 작기 때문에 6 m/s보다 낮은 풍속에서 농도 증가가 있을 것으로 예상됨에 따라 향후 이에 대해 추가연구가 필요할 것으로 예상된다.

일기 유형별 미세먼지 농도는 황사 시 가장 높은 농도를 보였으며, 강우 시 가장 낮았다. PM₁₀ 농도가 상승할수록 일반적인 기상(맑음, 흐림, 비)의 빈도는 낮아지고, 박무·안개·연무 등의 대기정체와 관련된 기상빈도가 상승하였다. 인천의 경우 해상의 온난 다습한 공기가 찬 지면으로 이류하여 안개(advection fog) 및 박무를 형성하는 경우가 빈번하며 수일동안 지속되기도 하기 때문에 대기환경 여건이 매우 불리하다. 2005년 연중 안개 발생일수가 14일(66%)로 가장 많은 6~7월의 미세먼지 농도가 연평균 농도(61 µg/m³)보다 15% 더 높게 측정되는 것도 이러한 기상조건의 영향으로 판단된다. 또한 상대습도가 높아질수록 PM₁₀ 농도가 상승하였으며, 상대습도 40%부터 10% 증가할 때마다 미세먼지 농도는 평균 6.7% 상승하였다. 높은 습도는 대기중 황산염 및 질산염 등의 2차 먼지의 생성을 촉진하며, 흡습작용과 수분 응축에 의한 액적효과(한진석, 2001)를 유발하기 때문에 미세먼지 농도상승에 영향을 미치는 것으로 추정된다.

해풍 발생일은 2005년 총 70일(19.2%)로 비 해풍일에 비해 PM₁₀ 농도가 18.2% 높게 측정되었으며, 해륙풍 지역으로 인해 지상풍속이 급격히 약화되는 일출·일몰 후에 고농도 현상을 뚜렷하게 발견할 수 있었다.

이상의 결과를 통해 기상인자가 인천지역 미세먼지 농도에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 그러나 인천지역에 산재되어 있는 도시대기측정망(10개소)의 PM₁₀ 자료를 인천기상대 1개소의 기상자료로 일반화해서 해석하기에는 다소 제한이 있었다. 향후 추가적으로 PM_{2.5} 관련 연구가 보완되어야 할 것이며 다양한 기상조건과 지역별 대기오염 배출량을 고려한다면 미세먼지 예보제 구축에 있어서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 문윤섭(1996) 부산연안역에

서의 대기오염기상 예보시스템 개발에 관한 연구, 한국환경과학회지, 5(4), 399-410.

민경덕, 강인식, 김경익, 김영섭, 김유근, 문영수, 변희룡, 안중배, 윤일희, 이광목, 이광호, 이동규, 이재규, 이태영, 이화운, 임규호, 전종갑, 정영근, 정형빈, 최효(2005) 대기과학개론, 시그마프레스(주), 172-174.

박일수, 이덕길, 강인구(1991) 서울 지역 겨울철 SO₂ 농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전학회지, 7(2), 96-104.

신찬기, 한진석, 김윤신(1992) 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 213-220.

오인보, 김유근, 황미경(2004) 연안도시지역 해풍지역이 오존분포에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 20(3), 345-360.

이화운, 김유근, 장난심, 이용희(1999) 부산광역시에서의 NO₂ 농도 특성 및 기상 영향인자 분석, 한국환경과학회지, 8(4), 465-471.

인천광역시(2000) 인천환경 대기질 개선 실천계획, 13-14.

인천기상대(2006) 인천기상대 기관소개, 인천기상대 홈페이지, <http://incheon.kma.go.kr>

임윤규, 김유근, 오인보, 송상근(2005) Tethersonde와 기상탑 관측자료를 이용한 울산지역 야간 역전에 따른 대기오염도 변화와의 관계, 한국환경과학회지, 14(6), 555-563.

전병일, 김유근, 이화운(1994) 해풍이 부산 지역의 대기오염 농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(4), 357-365.

정현준, 백승화, 서원호, 김종현(1999) 대전시 일부 지역의 대기 중 오존농도와 그 영향인자 분석, 한국환경관리학회지, 5(1), 67-73.

한진석(2001) 대기환경중의 미세먼지 특성과 시정장애현상, 미세먼지 영향 및 저감방안 전문가 토론회, 국립환경연구원, 서울대학교 보건대학원, 39-57.

Chow, J.C. and J.G. Watson(1997) Fugitive dust and other source contributions to PM₁₀ in Nevada's Las Vegas Valley. Report No. DRI 4039.1F. Prepared for Clark County Department of Comprehensive Planning, Las Vegas, NV, by Desert Research Institute, Reno, NV.

Watson, J.G. and J.C. Chow(2000) Reconciling urban fugitive dust emissions inventory and ambient source contribution estimates, Desert Research Institute, 3-5-3-6.