

대구지역 대기 중 미세먼지의 오염도 분석 및 기상인자에 따른 영향 평가

The Analysis of PM₁₀ Concentration and the Evaluation of Influences by Meteorological Factors in Ambient Air of Daegu Area

황윤정* · 이순진 · 도화석 · 이윤기 · 손태정
권택규 · 한정욱 · 강동훈 · 김종우
대구광역시 보건환경연구원 생활환경과

(2009년 7월 29일 접수, 2009년 9월 2일 수정, 2009년 9월 17일 채택)

Yoon-Jung Hwang*, Soon-Jin Lee, Hwa-Seok Do, Yun-Ki Lee,
Tae-Jung Son, Taek-Gyu Kwon, Jung-Wook Han,
Dong-Hun Kang and Jong-Woo Kim

Public Health and Environment Institute of Daegu Metropolitan City

(Received 29 July 2009, revised 2 September 2009, accepted 17 September 2009)

Abstract

Air Monitoring Network (11 urban stations) is operated to measure ambient air quality in Daegu city. The urban air monitoring stations include 6 in residence area, 3 in industrial area, 1 in commercial area, and 1 in green area. In this study, hourly data (2006. 1. 1~2008. 12. 31) of PM₁₀ were measured at 11 urban air monitoring stations. PM₁₀ mean concentrations were high in fall and winter because of low wind speed and many haze days. The number of exceeding the daily standard of PM₁₀ in industrial area was approximately twice as many as that in residence area. PM₁₀ concentrations and visibility were influenced significantly by wind speed. Wind speed and visibility were below 1.8 m/s and 10 km, respectively when PM₁₀ concentrations were over 120 µg/m³. PM₁₀ concentrations were high when haze was observed. The mean concentrations of PM₁₀ were 104±41.3 µg/m³, 63±35.1 µg/m³ and 49±26.9 µg/m³, respectively when haze, mist and clear were observed.

Key words : PM₁₀, Wind speed, Visibility, Haze, Mist, Air Monitoring Network

1. 서 론

대구는 지형적으로 북쪽에 팔공산, 남쪽에는 대덕산과 비슬산이 둘러싸고 있는 구릉지에 형성된 대표

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)53-760-1324, E-mail : min6603@daegumail.net

적인 분지형 도시이다. 따라서 대기안정도, 풍속, 강수량 등의 대기오염기상지수는 대기질 관리에 불리한 상황이다. 특히 성서공단, 서대구공단, 3공단 등의 주요 공단들이 모두 서북부 지역에 위치하고 있어 북서풍이 불면 오염물질이 동남부에 위치한 도심지로 유입될 가능성이 높은 실정이다.

또한 대구는 2011년 세계육상선수권 대회를 앞두고 있어 대기질 개선책의 일환으로 “클린&헬스 대구”, “대기환경 그린 프로젝트”, “신규 클린로드 시스템 설치” 등과 같은 여러 시책을 시행 중에 있다. 하지만 최근 들어 대기안정으로 인한 오염물질 정체로 연무현상이 자주 발생하여 고농도의 미세먼지(이하 PM₁₀)가 자주 관측되고 있어 clean air에 대한 시민들의 요구 또한 증대되고 있는 실정이다. 이러한 연무 및 박무일수의 증가와 시정악화, 고농도 PM₁₀ 관측 등의 문제는 대구뿐 아니라 수도권을 위시한 전국적인 문제로 인식되고 있다. 일례로 2008년 10월 15~20일 사이에 서울을 비롯한 수도권 일대에서 PM₁₀이 경보수준(200 µg/m³)은 아니나 평소보다 2~3배 높은 수준으로(일평균 농도 98~155 µg/m³) 장기간 지속됨에 따라 환경부에서는 정체성 고기압의 영향으로 혼합고가 낮아져(500~800 m) 대기오염물질이 확산되지 못해 고농도 현상이 지속되고 있다고 보도자료를 발표하기도 하였다(환경부, 2008).

PM₁₀ 이하의 먼지는 호흡 시 체내에 흡입되기 쉬우며, 비표면적이 크고 각종 유해성분을 함유하고 있어 환경보건학적 중요성이 매우 크다. 따라서 호흡기 질환, 시정 악화, 농작물 등의 생태계에 부정적인 영향을 야기한다는 사실은 널리 알려져 있다(Bahadur *et al.*, 2009; Brunelli *et al.*, 2007; 임영희 등, 2003; Heidi, 2000; Carlton *et al.*, 1999; Berico *et al.*, 1997). 환경부에서는 2007년부터 PM₁₀, NO₂의 대기환경기준을 강화하였으며, PM₁₀의 경우 연평균 기준은 70 µg/m³에서 50 µg/m³으로, 일평균 기준은 150 µg/m³에서 100 µg/m³으로 개정하여 이들 물질에 대한 오염도 저감에 비중을 강화하였다. 그러나 PM₁₀으로 인한 인체 영향은 장기기준(연평균)을 달성한다 하더라도 단기기준(일평균)을 초과할 경우 더 심각한 것으로 알려져 있어 단기간에 발생하는 고농도 오염물질의 중요도가 크며, 영국과 일본의 경우에는 장기기준 없이 단기기준만 설정되어 있다(백성욱과 구운서, 2008).

또한 대기질의 파악과 예측을 위해서는 그 당시의 기상조건이 중요한 변수로 작용하며, 도시지역의 대기질을 지배하는 주요 인자로 풍속, 기온, 강수량, 대기안정도 등이 거론되어져 왔다. 따라서 그 지역의 오염 특성을 해석하는 데 이러한 기상인자들이 중요한 정보로 제공되어져 왔으며(송상근과 손장호, 2008; Bäumer *et al.*, 2008; 김지아 등, 2007; Laakso *et al.*, 2003; 이화운 등, 1999; 정현준 등, 1999; 신찬기 등, 1992; 박일수 등, 1991), 연무, 박무와 같은 일기현상이 중요하게 인식되면서 이에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다(박기형 등, 2008; 이준복 등, 2008; 신문기 등, 2007; 김철희 등, 2004; 임주연 등, 2004).

따라서 본 연구에서는 대구시에서 운영 중인 대기오염측정망의 최근 3년간(2006~2008년)의 PM₁₀ 자료와 풍향, 풍속, 시정, 일기현상 등의 기상자료를 이용하여 대구지역의 PM₁₀ 분포 및 고농도 발생 현황을 평가하고, 기상 인자에 의한 특성을 파악함으로써 효율적인 대기질 관리를 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

대구시에서 운영 중인 총 13개 대기오염측정망 가운데 도시대기 측정소는 11개소로 주요 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO, PM₁₀)을 연속 측정하고 있다. 용도지역별로 구분해 보면 주거지역 6개소(태전동, 신암동, 지산동, 만촌동, 율하동, 대명동), 공업지역 3개소(이현동, 노원동, 갈산동), 상업지역 1개소(수창동), 녹지지역 1개소(현풍면)로 분류되며, 대부분 초등학교 또는 관공서 옥상에 설치되어 있다(그림 1).

본 연구는 2006년 1월 1일부터 2008년 12월 31일 까지 최근 3년간 11개 도시대기 측정소에서 전송되는 PM₁₀(베타선 흡수법) 시간 자료를 분석하였으며, 유효측정비율 75% 이상인 자료만 포함하였다. 풍향, 풍속, 일기, 시정 등의 기상자료는 자동기상관측자료(AWS)의 시간자료를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 개황 평가

최근 3년간 대구의 기상 개황은 표 1에 나타내었

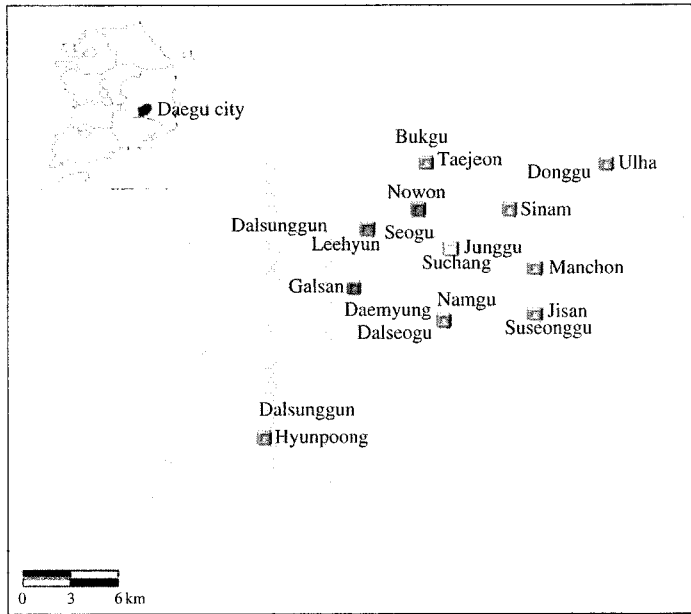


Fig. 1. Location of urban air monitoring stations in Daegu.

Table 1. General weather conditions in Daegu (2006~2008).

Year	Temp. (°C)	Rainfall (mm)	Wind speed (m/s)	Relative humidity (%)	Yellow sand (day)	Mist (day)	Haze (day)
2008	14.6	761.4	2.2	57.2	6	145	96
2007	15.0	973.7	2.2	58.4	9	178	30
2006	14.6	784.1	2.4	58.1	11	143	16

다. 연간 총 강수량은 2006년 784.1 mm, 2007년 973.7 mm, 2008년 761.4 mm로 1,000 mm 이하로 적었으며, 전체 강수량 중 8~9월이 절반 이상을 차지해 여름철을 제외하면 연중 강우에 의한 세정효과를 크게 기대하기는 어려운 실정이었다. 특히 2008년의 경우 총 강수량이 761.4 mm로 전국 7대 도시에 가장 적었으며, 비가 가장 많이 내린 서울(1,356.3 mm)에 비해 약 600 mm나 적은 수준이었다(그림 2).

연간 평균 풍속은 2.2~2.4 m/s로 큰 변화는 없었으며, 연평균 풍속이 약 3 m/s에 이르는 해안지역인 부산, 인천 등에 비하면 매우 낮은 편이다(기상청). 2006~2008년 3년간의 월별 평균 풍속은 봄철인 3월(2.8±1.6 m/s)과 4월(2.7±1.6 m/s)이 가장 높았다. 또한 10월과 11월을 제외하면 평균 풍속이 모두 2.0 m/s 이상으로 나타났으나 10월은 1.7±1.2 m/s, 11월은 1.9±1.3 m/s로 특히 낮았다(그림 3).

연도별 황사 발생횟수 및 지속일수는 2006년 7회 11일, 2007년 5회 9일, 2008년 3회 6일로 나타나 2006년이 황사 발생횟수가 가장 많았던 것으로 나타났다. 또한 주로 3~5월에 나타났으며, 2007년과 2008년에는 12월에도 황사가 발생해 겨울철 황사가 관측되었다.

연간 박무일수는 2006년 143일, 2007년 178일, 2008년 145일로 큰 변화가 없었으나 연무일수는 2006년 16일, 2007년 30일, 2008년 96일로 매년 증가하고 있으며, 2008년에 크게 급증하였다. 월별 박무일수는 6월과 7월에 가장 많았으며, 연무일수는 10~12월의 가을, 겨울철에 가장 많았다(그림 4). 또한 2006년과 2007년의 7월에는 연무 발생일수가 전혀 없었으나 2008년 7월에는 18일로 이례적으로 많았으며, 월 강수량은 하절기임에도 불구하고 77.7 mm로 적은 편이었다.

풍향은 3년간의 시간별 풍향 자료를 이용하여 계절별 풍배도로 비교해 보았으며(봄 3~5월, 여름 6~8월, 가을 9~11월, 겨울 1~2월, 12월), 그림 5에 나

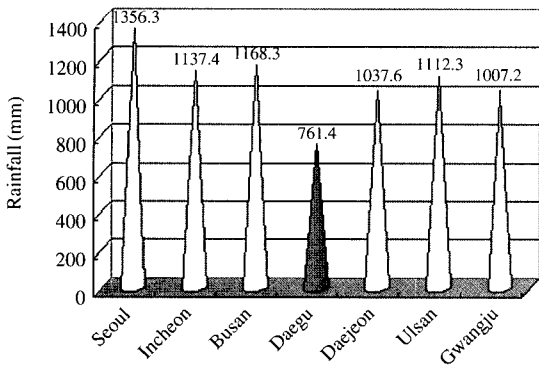


Fig. 2. Annual total rainfall in main (2008).

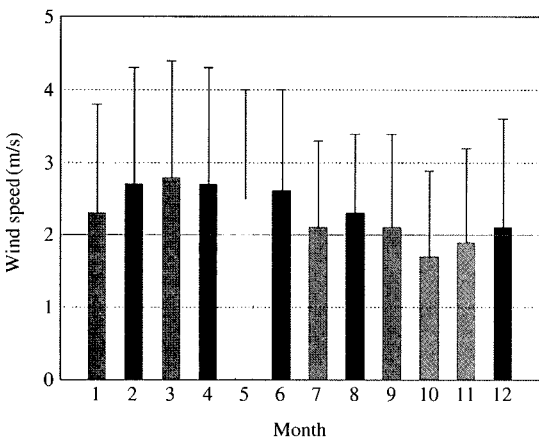
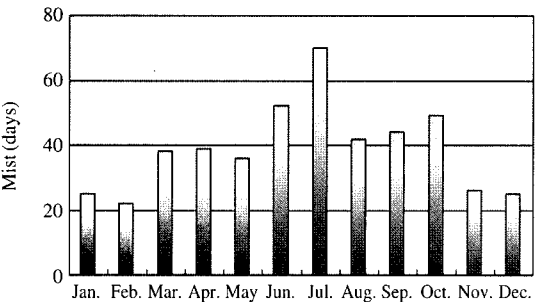


Fig. 3. Monthly mean wind speed in Daegu (2006~2008).



타난 바와 같이 대구의 경우 여름철은 동풍계열이 주 풍향으로 작용하나 그 외 봄, 가을, 겨울은 서풍계열이 우세하였다.

또한 풍향별 빈도는 그림 6에 나타내었으며, 서북서풍 16.9%, 서풍 14.3%로 이들 두 계열이 약 30% 정도로 큰 부분을 차지했다. 그 다음으로 동남동풍이 11.6%로 높게 나타났으며, 이외의 나머지 계열들은 8% 이하로 적은 부분을 차지했다.

따라서 대구는 분지지형 내에 공업지역(서대구공단, 3공단, 성서공단)이 모두 서 또는 서북서 지역에 위치하고 있고, 주 풍향 또한 서북서풍과 서풍으로 나타나 대기질 관리 측면에서 공단배치 등의 지리적 조건이 불리한 상황인 것으로 판단된다.

3. 2 PM₁₀ 오염도 및 기준초과 현황

대구지역의 지난 10여 년간의 PM₁₀ 연평균 농도는 '96년 이래로 상당 수준 저감되었으나 2001년(67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 2002년(71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 황사의 영향으로 상승하였다(그림 7). 이후 소폭의 수준이긴 하나 점차적으로 감소되어 2007년에는 연평균 농도가 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 개선되었으나 2008년에는 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다시 상승하였다. 타 도시들과 비교해 보면 2006년과 2007년 대구의 연평균 농도(53~54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 인천(64~68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 서울(60~61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 부산(57~59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 낮은 수준이었으나 2008년에는 대구가 인천과 함께 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 이와 같이 2008년 대구지역의 오염도가 특히 상승한 것은 앞에서 언급한 바와 같이 강수량의 감소와 연무일수의 증가에 따른 것으로 판단된다.

월별 오염도 현황은 황사가 주로 나타나는 3월(74 \pm 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 4월(73 \pm 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 5월(60 \pm 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

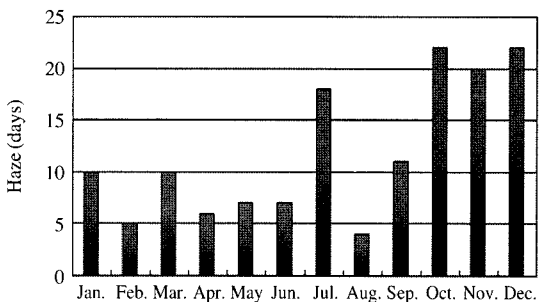


Fig. 4. Total days of haze and mist by month in Daegu (2006~2008).

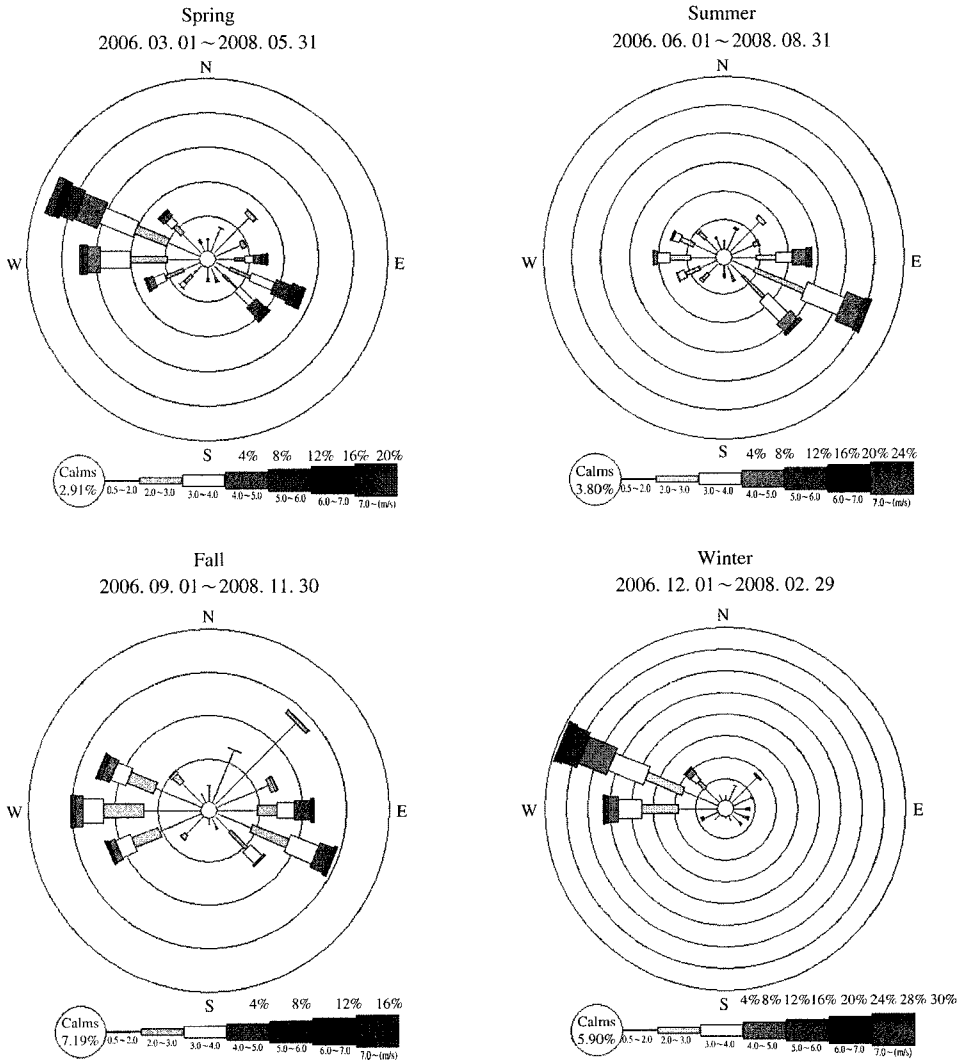


Fig. 5. Comparison of wind roses by season in Daegu (2006~2008).

에 가장 높았으며, 이외에 10~12월의 가을, 겨울철에도 특히 높게 나타났다(그림 8). 10~12월의 오염도 증가는 낮은 풍속 및 연무일수 증가와 일치하는 것으로 나타났다. 또한 강수량이 많은 8월과 9월에는 평균농도가 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮았다.

일반적으로 연평균 농도가 개선되었다 하더라도 단기간에 발생하는 고농도의 오염물질은 인체 위해도가 더 크므로 단기환경기준 달성여부가 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다(백성욱, 2007). 따라서 본 연구에서는 2007년부터 개정 강화된 일평균 기준인

$100 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{일}$ 을 기준으로 동일한 조건하에서 2006년 자료부터 비교해 보았다.

그 결과 측정소당 평균 초과횟수는 2006년 20.3회(총 223회), 2007년 14.6회(총 161회), 2008년 22.8회(총 251회)로 2008년에 연평균 농도 상승과 함께 초과횟수 또한 증가하였다. 월별 초과현황 역시 월평균 농도가 높았던 3~4월의 봄철과 10~12월의 가을, 겨울철에 가장 높게 나타났다(그림 9). 또한 2008년 1월은 월평균 농도가 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2006년과 2007년의 동월에 비해 큰 차이는 없었으나 단기

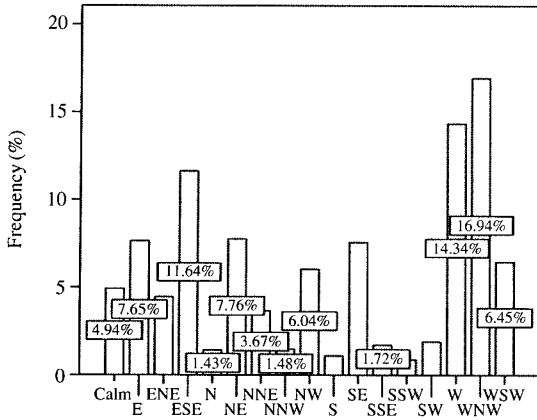


Fig. 6. Frequency (%) of wind direction in Daegu (2006~2008).

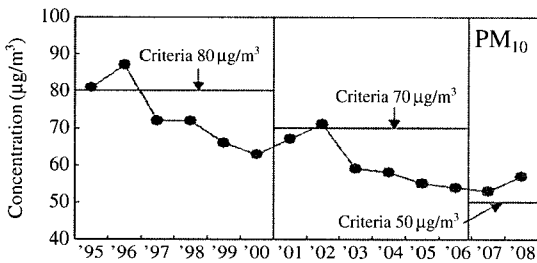


Fig. 7. Variation of annual mean concentrations of PM₁₀ in Daegu.

환경기준 초과횟수는 총 49회로 많았다. 기준초과일의 대부분은 연무현상이 관측되었으며, 일평균 풍속은 0.9~1.5 m/s 수준으로 1월 월평균(2.0 m/s)에 비해 상당히 낮은 편이었다. 다른 도시들과 비교해 볼 때 2007년 서울과 인천의 연간 측정소당 평균 초과횟수는 각각 43.9회, 45.9회로 나타나 대구의 고농도 PM₁₀ 발생 현황은 수도권에 비하면 양호한 상태인 것으로 판단되었다(환경부, 2008).

측정소별 PM₁₀ 오염도는 예상한 바와 같이 공업지역이 가장 높게 나타났으며, 이들 공업지역에 위치한 측정소의 2008년 연평균 농도는 이현동(서대구공단) 65 µg/m³, 노원동(3공단) 67 µg/m³, 갈산동(성서공단) 64 µg/m³으로 모두 60 µg/m³ 이상으로 높게 나타났다(그림 10). 단기환경기준 총 초과횟수는 연도별로 이현동 측정소가 41~50회로 가장 많았으며, 갈산동

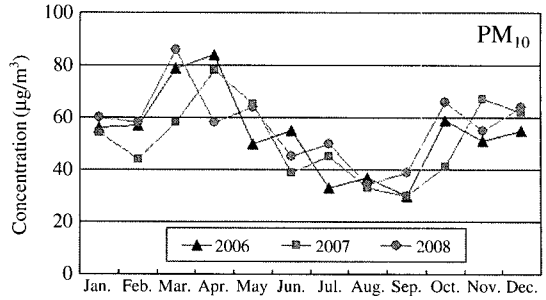


Fig. 8. Variation of monthly mean concentrations of PM₁₀ in Daegu.

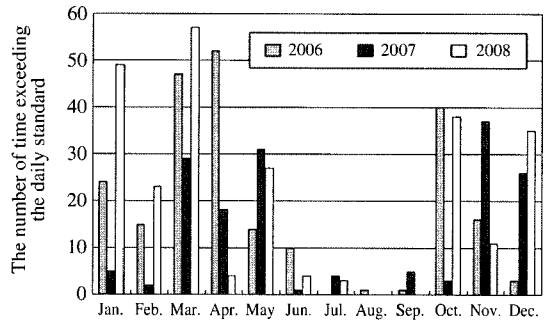


Fig. 9. The number of time exceeding the daily standard (100 µg/m³/day) of PM₁₀ by month.

측정소는 7~28회로 이현동과 노원동에 비해 적은 편이었다.

주거지역의 경우에는 연평균 농도가 측정소별로 큰 차이가 없었지만 그 중에서도 지산동 측정소가 대체로 오염도가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 강화된 장기환경기준(50 µg/m³/년)을 만족한 지점은 대명동, 신암동, 태전동의 일부 지점에 국한되었던 것으로 나타났다(대명동 2007년 47 µg/m³, 신암동 2007년 44 µg/m³, 태전동 2008년 49 µg/m³).

주거지역 내 측정소들의 연도별 단기환경기준 초과횟수는 동구 율리동과 신암동, 북구 태전동이 9~19회인 반면에 지산동은 17~26회로 많았다. 수성구에 위치한 지산동의 경우 분지 속의 분지라 할 정도로 갇힌 공간이라 할 수 있어 대기확산이 중요한 변수로 작용하는 것으로 추정되었다.

상업지역인 수창동 측정소는 2006년과 2007년 연평균 농도가 각각 50 µg/m³, 52 µg/m³으로 유사했으

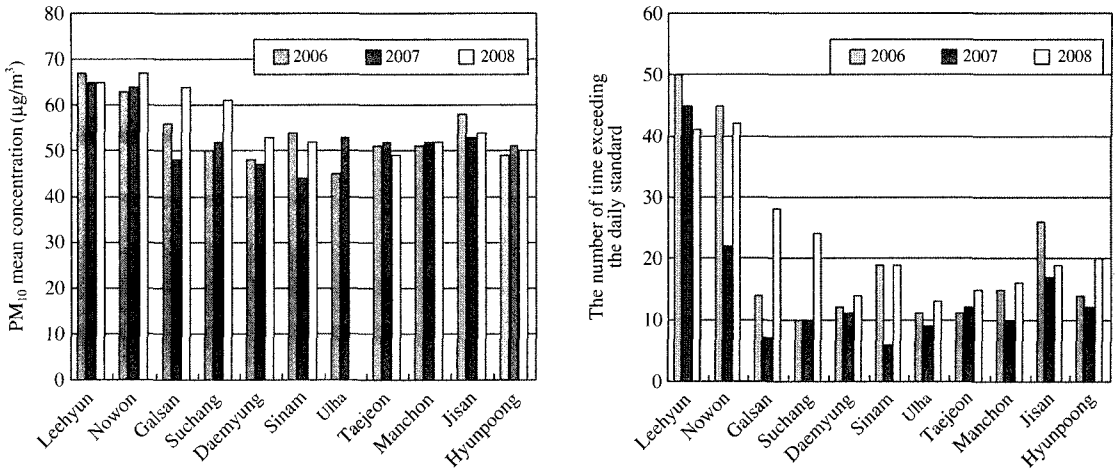


Fig. 10. PM₁₀ mean concentrations and the number of time exceeding the daily standard of PM₁₀ by urban air monitoring stations.

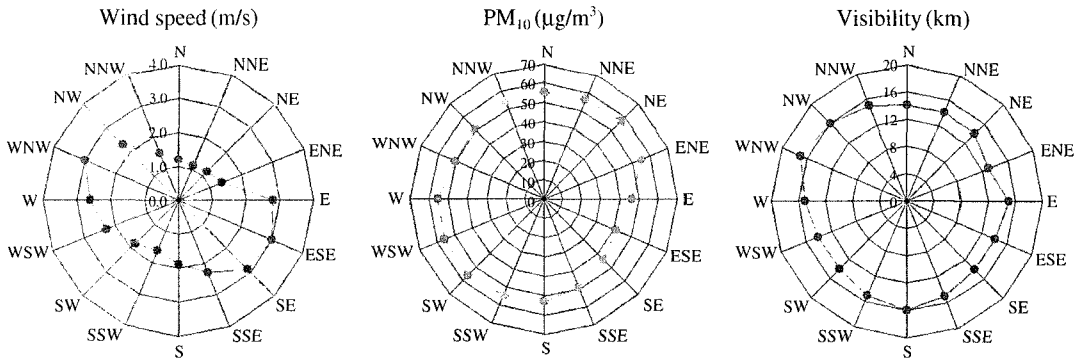


Fig. 11. Comparison of PM₁₀, wind speed, and visibility by wind direction.

나 2008년에는 61 µg/m³로 높게 나타났으며, 녹지지역으로 분류되는 현풍면 측정소는 오염도가 49~51 µg/m³로 연도별로 큰 차이를 보이지 않았다.

또한 2008년 용도지역별 대기환경기준 평균 초과 횟수는 주거지역이 16회, 상업지역 24회, 공업지역 37회로 나타나 공업지역이 주거지역에 비해 2배 이상 많았던 것으로 조사되었다.

3.3 기상인자에 의한 PM₁₀ 농도 변화

3.3.1 풍향

기상인자에 의한 PM₁₀ 영향 평가시 2006년 1월 1

일~2008년 12월 31일 3년간의 PM₁₀ 농도와 기상인자의 시간자료를 이용하였으며, 통계처리시 고농도에 피소드에 해당하는 황사 시 자료는 제외하였다.

풍향에 따른 풍속, PM₁₀, 시정의 변화는 그림 11에 전체자료에 대한 산술평균값으로 나타내었다. 풍향별 풍속은 북서풍과 남동풍 계열일 때 높고, 북동풍과 남서풍일 때 풍속이 낮았던 것으로 나타났다. PM₁₀의 경우에는 풍향에 따라 농도 변화가 그리 크지 않았지만 무풍(Calm)일 때 평균 농도가 57.2±33.9 µg/m³으로 가장 높았으며, 북동풍(56.5±31.5 µg/m³)과 남서풍(56.2±31.4 µg/m³)에서도 고농도를 나타내었다. 또한 이때의 평균풍속은 각각 1.2±0.5 m/s

(북동풍), 1.8 ± 0.9 m/s(남서풍)로 상당히 낮았다.

이에 반해 풍향의 출현빈도가 가장 높았던 서풍과 서북서풍일 때는 PM_{10} 평균 농도가 각각 $55.0 \pm 32.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $50.5 \pm 28.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이때의 평균 풍속은 2.6 ± 1.3 m/s(서), 3.0 ± 1.6 m/s(서북서)로 높았다. 또한 PM_{10} 이 가장 저농도를 나타낸 경우는 동남동 $41.5 \pm 27.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 남동 $43.8 \pm 28.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 동 $45.7 \pm 30.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 주로 동풍 계열이었으며, 이때의 평균 풍속은 역시 2.8~3.0 m/s로 높은 편이었다.

풍향에 따른 시정의 변화의 살펴보면 서북서풍(16.5±5.7 km)과 북서풍(16.0±5.9 km)일 때 시정이 가장 좋았으며, 무풍(12.5±4.8 km)과 동북동(13.3±5.2 km)일 때 좋지 않았다. 이 경우에도 시정이 좋았던 서북서풍일 때 평균 풍속은 3.1 m/s로 높았으나 시정이 좋지 않았던 동북동풍일 때는 평균 풍속이 1.4 m/s로 낮았다.

또한 Pearson Correlation에 의한 상관성 분석에서 풍속과 시정은 양의 상관, 풍속과 PM_{10} , 시정과 PM_{10} 은 음의 상관을 나타내었으며, 모두 유의수준 1%에서 상관성이 있는 것으로 나타났다(상관계수: 풍속

vs 시정 0.305**, 풍속 vs PM_{10} -0.161**, 시정 vs PM_{10} -0.285**, ** Correlation is significant at the 0.01 level).

3.3.2 풍 속

풍속 구간에 따른 발생빈도, PM_{10} , 시정의 변화는 표 2에 나타내었다. 풍속 구간은 무풍으로 분류되는 0.2 m/s 이하와 0.3~1.0 m/s, 1.1~2.0 m/s, 2.1~3.0 m/s, 3.1~4.0 m/s, 4.1~5.0 m/s, 5.1 m/s 이상의 7구간으로 분류하였다. 이 가운데 풍속이 1.1~2.0 m/s 구간에서 발생빈도가 약 30%로 가장 많은 부분을 차지했으며, 그 다음으로 2.1~3.0 m/s 구간이 약 22%를 하는 것으로 나타났다.

일반적으로 풍속이 높을수록 PM_{10} 오염도는 낮아지고, 시정은 더 좋아지는 것으로 나타났으며, PM_{10} 평균 농도는 풍속 0.3~1.0 m/s 구간에서 가장 높았다. 또한 풍속 1.1~2.0 m/s일 때 PM_{10} 은 $54.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 풍속 2.1~3.0일 때 PM_{10} 은 $48.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 두 구간 사이에 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 풍속 5.1 m/s 이상에서 PM_{10} 이 $47.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높

Table 2. Comparison of PM_{10} and visibility by wind speed range.

Wind speed range (m/s)	Wind speed frequency		PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Visibility (km)			
	N	%	Mean	S.D.	Min.	Max.	Mean	S.D.	Min.	Max.
0~0.2	6,720	2.7	57.4	34.6	6	294	12	4.7	0.1	30
0.3~1.0	45,026	18.0	58.2	33.7	6	317	13	5.0	0.1	30
1.1~2.0	74,659	29.8	54.0	31.4	6	307	14	5.2	0.1	30
2.1~3.0	55,719	22.3	48.4	29.0	6	359	15	5.5	1.5	35
3.1~4.0	36,962	14.8	44.6	27.0	6	237	16	5.7	1.5	30
4.1~5.0	19,608	7.8	44.1	26.2	6	222	18	5.9	1.5	35
5.1~	11,452	4.6	47.1	29.5	6	525	19	6.0	5.0	35

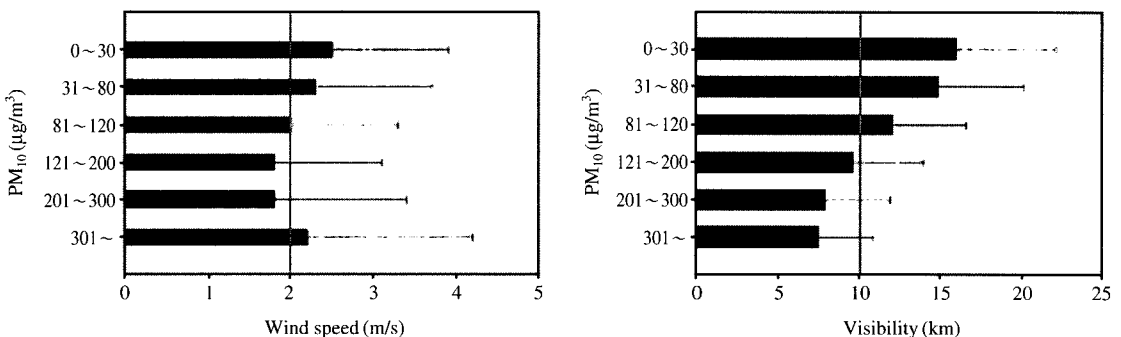


Fig. 12. Comparison of wind speed and visibility by PM_{10} concentration range.

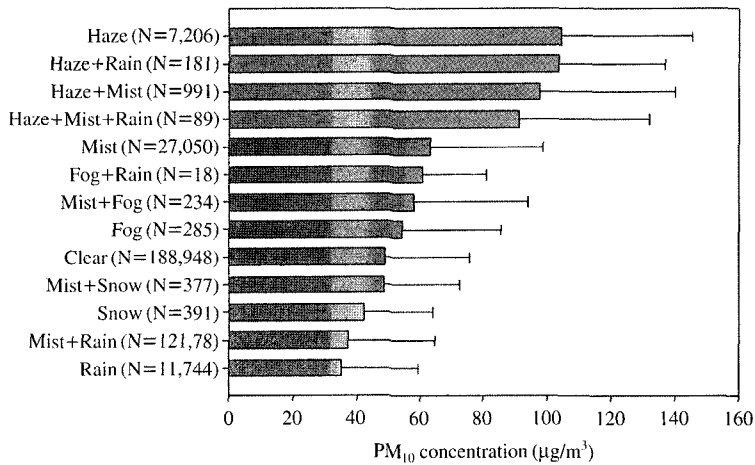


Fig. 13. Comparison of PM₁₀ concentration by weather condition.

아진 것은 황사 전날 야간의 일부 자료가 고농도를 나타낸 결과로 추정되었다(2006년 3월 13일 24시 지산동 측정소 PM₁₀ 525 µg/m³).

PM₁₀ 농도 구간별 풍속과 시정의 변화는 그림 12에 나타내었으며, PM₁₀의 농도 구간 구분은 통합대기환경지수(Comprehensive Air Quality Index, 이하 CAI)의 6단계(좋음 0~30 µg/m³, 보통 31~80 µg/m³, 민감군 영향 81~120 µg/m³, 나쁨 121~200 µg/m³, 매우 나쁨 201~300 µg/m³, 위험 301 µg/m³~)에 기초하여 분류하였다.

PM₁₀ 0~30 µg/m³의 좋음 구간에서는 풍속이 2.5 m/s로 가장 높았으며, 시정 또한 16km로 가장 좋았다. PM₁₀ 농도가 높아질수록 풍속은 감소하고 시정은 나빠지는 양상을 나타내었으며, PM₁₀ 121~300 µg/m³의 고농도 구간에서는 풍속 1.8 m/s, 시정 8km로 특히 낮게 나타났다.

그러나 PM₁₀ 301 µg/m³ 이상의 고농도 구간에서의 평균 풍속은 2.2 m/s로 증가하였으며, 이는 앞서 언급한 2006년의 일부 자료가 높은 수치를 나타낸 것에 기인한 것으로 판단된다. PM₁₀ 301 µg/m³ 이상의 고농도 구간에 대해 연도별로 자료를 분석한 결과 2006년의 경우에는 풍속이 5.2 m/s (PM₁₀ 525 µg/m³, N=1)로 이상치에 가까운 높은 자료가 포함되었으며, 2007년과 2008년의 평균 풍속은 각각 2.1 m/s (PM₁₀ 평균 농도 307 µg/m³, N=4), 1.5 m/s (PM₁₀ 평균 농도 319 µg/m³, N=4)로 나타났다. 2007년과

2008년 자료에 대한 일기 상황은 대부분 연무였던 것으로 나타났다.

3. 3. 3 일기 현상

일기 현상은 대기질과 밀접한 관련이 있으므로 본 연구에서는 일기 현상 시간자료와 대기질 시간자료를 이용하여 일기 현상별 오염도를 비교해 보았다. 일반적인 기상조건하에서의 특성을 평가하기 위해 황사시 자료는 제외하였다.

먼지현상으로 분류되는 연무가 관측되었을 때 PM₁₀ 평균 농도는 104.2±41.3 µg/m³으로 가장 높았으며, 연무와 다른 현상들이 동반 관측되었을 때도 PM₁₀이 91 µg/m³ 이상으로 고농도를 나타내었다. 이에 반해 물현상으로 분류되는 박무 현상이 관측되었을 경우에는 PM₁₀이 63.4±35.1 µg/m³, 안개 발생시 54.3±31.1 µg/m³로 연무시에 비해 저농도를 나타내었다(그림 13). 또한 통계적으로 유의적인 차이가 있는지를 검증하기 위해 Mann-Whitney U Test(SPSS, 2006)를 실시한 결과 연무와 박무, 연무와 안개는 유의수준 5%에서 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다. 맑은 날의 PM₁₀ 평균 농도는 48.8±26.9 µg/m³, 강우시 35.0±24.4 µg/m³로 낮게 나타났다.

또한 연무일수가 급증했던 2008년의 자료만 이용했을 경우에도 PM₁₀ 오염도는 연무(107 µg/m³) > 박무(69 µg/m³) > 안개(55 µg/m³) > 맑음(51 µg/m³) > 눈(49 µg/m³) > 비(43 µg/m³) 순으로 높게 나타났다(황

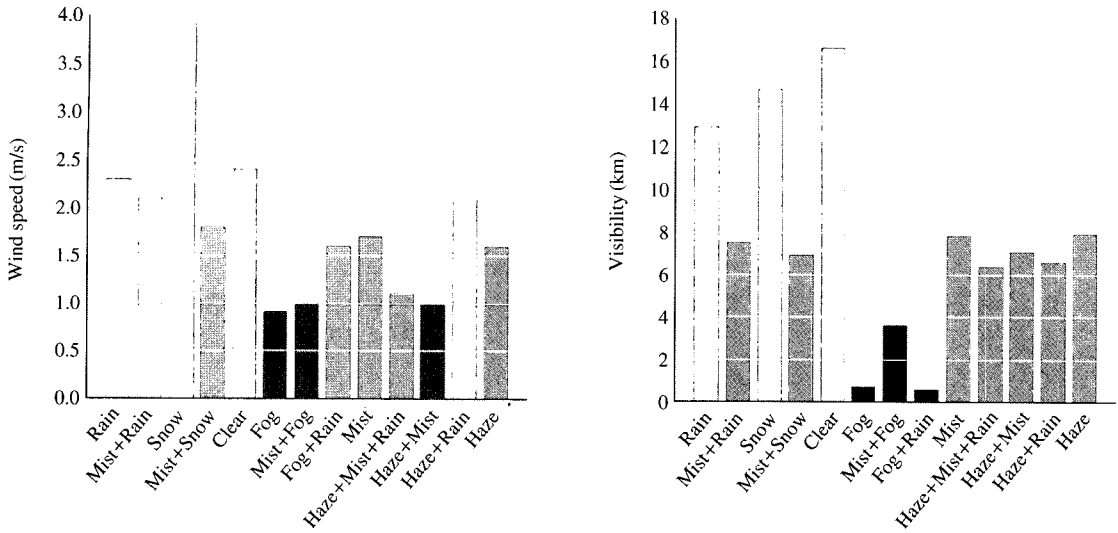


Fig. 14. Comparison of wind speed and visibility by weather condition.

Table 3. Frequency (%) of occurring high PM₁₀ concentrations by weather condition.

Item	PM ₁₀ > 80 μg/m ³		PM ₁₀ > 120 μg/m ³		PM ₁₀ > 200 μg/m ³	
	N	%	N	%	N	%
Rain (N=11,744)	628	5.3	114	1.0	1	0.0
Mist+Rain (N=12,178)	955	7.8	210	1.7	0	0.0
Snow (N=391)	22	5.6	2	0.5	0	0.0
Mist+Snow (N=377)	35	9.3	6	1.6	0	0.0
Clear (N=188,946)	22,991	12.2	3,443	1.8	86	0.0
Fog (N=285)	61	21.3	17	5.9	0	0.0
Mist+Fog (N=234)	50	21.3	16	6.8	1	0.4
Fog+Rain (N=18)	4	21.1	1	5.3	0	0.0
Mist (27,050)	7,374	27.3	1,912	7.1	55	0.2
Haze+Mist+Rain (N=89)	50	55.6	23	25.6	0	0.0
Haze+Mist (N=991)	600	60.5	261	26.3	19	1.9
Haze+Rain (181)	136	74.7	59	32.4	1	0.5
Haze (N=7,206)	5,005	69.4	2,206	30.6	153	2.1

윤정 등, 2009).

신문기 등(2007)의 연구에 따르면 2005년 인천 대기질의 경우 연무시 PM₁₀ 평균은 117.4 μg/m³, 박무시 92.3 μg/m³, 안개시 114.1 μg/m³로 연무뿐만 아니라 박무와 안개시에도 높게 나타났다. 따라서 이러한 차이는 해풍이 불고 상대습도가 높은 해안지역과 대구와 같은 내륙지역의 지역에 따른 특색인 것으로 판단된다.

일기현상에 따른 풍속과 시정의 변화는 그림 14에 나타내었다. 풍속과 시정은 안개가 관측되었을 때 풍

속 1 m/s 이하, 시정 4 km 이하로 가장 좋지 않았다. 또한 연무와 박무 현상이 관측되었을 때도 풍속 2 m/s 이하, 시정 8 km 이하로 낮았다.

특정 일기현상이 나타났을 때 PM₁₀이 81 μg/m³ 이상, 121 μg/m³ 이상, 201 μg/m³ 이상의 고농도 오염도가 발생한 빈도(%)는 표 3에 나타내었다. 맑은 날인 경우 PM₁₀ 농도가 81 μg/m³ 이상으로 나타난 빈도는 12.2%, 121 μg/m³ 이상인 빈도는 1.8%로 낮았다. 박무시에는 PM₁₀ 81 μg/m³ 이상이 27.3%, 121 μg/m³ 이상이 7.1%였으며, 이에 반해 연무 관측시에는 81 μg/

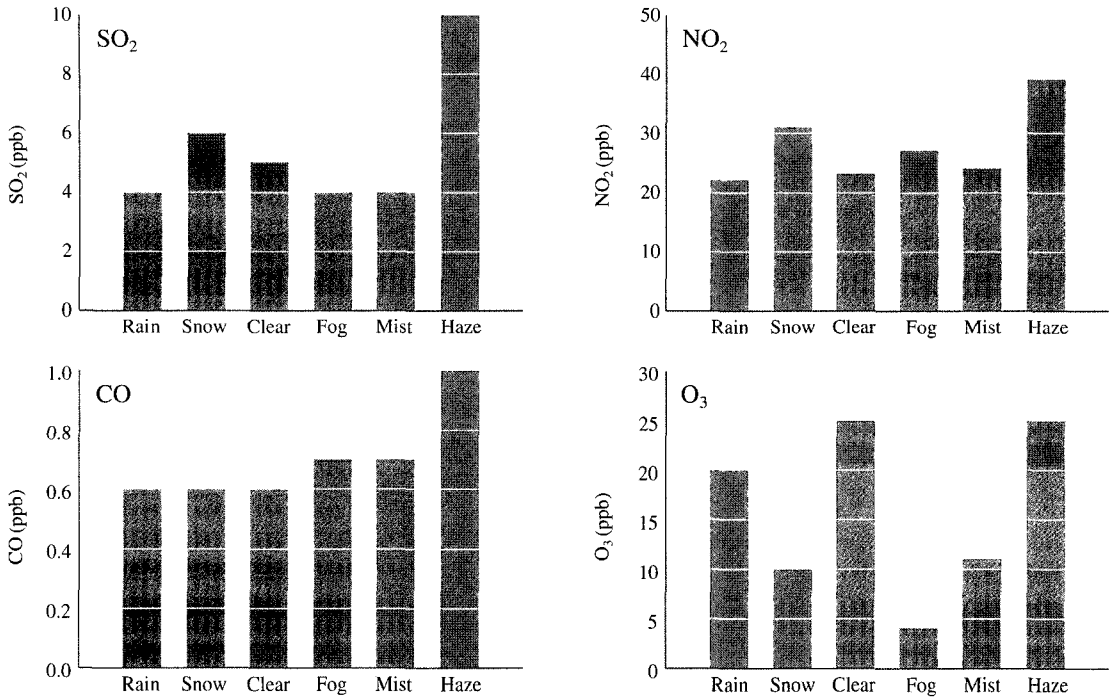


Fig. 15. Comparison of SO₂, NO₂, CO, and O₃ by weather condition.

m³ 이상이 69.4%, 121 µg/m³ 이상이 30.6%로 매우 높게 나타났다. 또한 연무와 다른 일기현상이 동반 관측되었을 경우에도 PM₁₀ 81 µg/m³ 이상은 55.6% 이상, 121 µg/m³ 이상은 25.6%로 높게 나타났다.

일기현상에 따른 가스상 오염물질의 농도 변화는 그림 15에 나타내었으며, 평가 시 2008년의 도시대기 측정망 시간자료를 이용하였다. SO₂, NO₂를 비롯한 모든 항목이 연무 관측 시에 가장 고농도를 나타내었다. SO₂의 경우 연무가 관측될 때 평균 농도는 10 ppb로 맑은 날이나 박무 시에 비해 2배 이상 높았다. NO₂ 역시 연무 관측 시에 평균 농도가 39 ppb로 맑은 날에 비해 약 1.7배 정도 높은 것으로 나타났다. O₃는 맑은 날과 유사할 정도의 고농도를 나타내었으며, CO는 일기현상에 따라 그리 큰 차이를 보이지 않았다. 이전 선행연구(황윤정 등, 2008) 결과에 따르면 중금속 역시 연무 시에 가장 고농도를 나타내었으며, Pb, Cd, Ni 등은 맑은 날에 비해 2배 이상 높게 나타나 연무 입자를 구성하는 성분은 주로 인위적인 오염원에 기인하는 것으로 추정되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 대구지역에서 운영 중인 대기오염측정망 가운데 도시대기 11개소의 2006~2008년 3년간 PM₁₀ 시간자료와 풍향, 풍속, 시정, 일기 현상 등의 기상 자료를 이용하여 대구지역의 PM₁₀의 오염도 현황을 파악하고 기상요인에 따른 영향을 평가하였다.

그 결과 PM₁₀은 2001년 이래로 소폭의 수준이기는 하지만 꾸준히 개선되었으나 2008년은 강수량의 감소와 연무일수 증가로 인해 연평균 농도 상승과 더불어 고농도 발생횟수가 증가하였다. 계절별로는 황사가 나타나는 봄철 이외에 풍속이 낮고 연무일수가 많았던 가을, 겨울철에도 고농도를 나타내었다. 지점별로는 공업지역이 주거지역에 비해 단기환경기준 초과횟수가 2배 이상 많았으며, 공업지역 가운데서는 성서공단에 비해 서대구공단과 3공단의 오염도가 더 높은 것으로 나타났다.

기상인자별 영향 평가에서 PM₁₀ 오염도는 풍향에

따라 큰 차이는 없었지만 무풍일 때와 북동풍일 때 농도가 가장 높았으며, 이때의 평균 풍속은 1.2 m/s로 낮았다. 또한 풍향의 빈도가 가장 높았던 서풍과 서북서풍의 경우 풍속이 2.6 m/s 이상으로 높게 나타나 공단이 서 또는 서북서 지역에 위치함에도 불구하고 원활한 대기확산으로 인해 PM₁₀ 농도는 51~55 µg/m³ 수준으로 크게 높지 않았다. 또한 남동풍과 동남동풍의 바람이 불 때는 풍속이 2.9 m/s 이상으로 높았으며, PM₁₀은 42~44 µg/m³ 수준으로 가장 낮았다. 또한 풍속이 1.1~2.0 m/s 구간일 때 PM₁₀ 농도는 54.0 µg/m³, 2.1~3.0 m/s 구간에서는 48.4 µg/m³로 나타나 대구와 같은 분지의 경우 대기질 관리 측면에서 풍속이 매우 중요한 인자로 작용하는 것으로 판단되었다.

일기현상별로는 연무가 관측될 때 PM₁₀ 평균 농도는 104.2 µg/m³로 가장 높았으며, 81 µg/m³ 이상으로 측정된 빈도는 69.4%, 120 µg/m³ 이상으로 측정된 빈도는 30.6%로 높게 나타났다. 또한 해풍이 부는 인천과 같은 해안지역의 경우에는 연무와 박무 관측시의 PM₁₀ 농도가 그리 큰 차이를 보이지 않았으나 대구의 경우에는 박무 관측시에 PM₁₀ 평균이 63.4 µg/m³로 나타나 연무의 경우와는 상당한 차이를 나타내었다. 이와 같이 연무, 박무시 PM₁₀ 농도가 구분되는 것은 해안지역과는 구별되는 내륙지역의 특색인 것으로 판단되었다. 연무 관측시 평균 시정은 8 km 이하로 좋지 않았으며, 입자상 물질인 PM₁₀뿐만 아니라 SO₂ 등의 가스상 오염물질과 Pb 등의 중금속 또한 고농도를 나타내었다.

따라서 연무 발생시에는 호흡기질환자 및 오염취약계층들에게 실외활동 자제를 적극 홍보할 필요가 있으며, 필요에 따라 마스크를 착용하도록 권고하면 고농도 오염물질로부터 인체 노출을 상당 수준 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

기상청 (2008) 날씨정보, www.kma.go.kr.
 김지아, 진형아, 김철희 (2007) 부산 지역 미세먼지 농도의 시간변동 특성 및 기상인자 분석을 통한 먼지생성 해석, 한국환경과학회지, 16(10), 1157-1167.
 김철희, 박일수, 이석조, 김정수, 진형아, 성한규 (2004) 지역 대기질 측정망에 나타난 국내 대기오염도의 최근

동향-2002년 고농도 사례 및 그 기상 특징, 한국 대기환경학회지, 20(2), 215-224.
 박기형, 이병규, 정수근, 함유식 (2008) 박무현상시와 맑은 날의 대기 중 중금속 농도 특성 비교, 한국대기환경학회 2008 춘계학술대회 논문집, 537-539.
 박일수, 이덕길, 강인구 (1991) 서울 지역 겨울철 SO₂ 농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전학회지, 7(2), 96-104.
 백성옥 (2007) 대구시 대기질의 종합적인 관리방안, 대구지역환경기술개발센터.
 백성옥, 구윤서 (2008) 수도권 대기환경 개선사업-진단과 제언, 한국대기환경학회지, 24(1), 108-121.
 송상근, 손장호 (2008) 부산시 해안 및 내륙지역에서 광화학 오염물질의 농도 차이에 영향을 주는 화학 및 기상조건 분석, 한국환경과학회지, 17(10), 1169-1182.
 신문기, 이충대, 하현섭, 최춘석, 김용희 (2007) 기상인자가 미세먼지 농도에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 23(3), 322-331.
 신찬기, 한진석, 김윤신 (1992) 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 213-220.
 이준복, 강미혜, 안미진, 김영호, 유승성, 신덕영, 전은미, 김홍주, 정 권 (2008) 2007년 서울지역 연무 사례 조사, 한국대기환경학회 2008 춘계학술대회 논문집, 540-541.
 이화은, 김유근, 장난심, 이용희 (1999) 부산광역시에서의 NO₂ 농도 특성 및 기상 영향인자 분석, 한국환경과학회지, 8(4), 465-471.
 임영희, 안창혁, 박계영, 정성환, 주영수 (2003) 황사 기간 중 천식환자가 대기 중 미세먼지 (PM₁₀) 최대호기 유속과 호흡기 증상에 미치는 영향, 대한결핵 및 호흡기학회지, 55(6), 570-579.
 임주연, 전영신, 조경미, 이상삼, 신혜정 (2004) 2003년 5월 연무 관측시 에어로졸의 기상·물리·화학 특성, 한국대기환경학회지, 20(5), 697-711.
 정헌준, 백승화, 서원호, 김종현 (1999) 대전시 일부 지역의 대기 중 오존농도와 그 영향인자 분석, 한국환경관리학회지, 5(1), 67-73.
 환경부 (2008) 대기환경연보 2007, 311.
 환경부 (2008) 최근의 미세먼지 고농도 현상 지속 우려, www.me.go.kr, 2008년 10월 20일 등록.
 황윤정, 강동훈, 이순진, 손태정, 권택규, 한정옥, 박희욱, 장성환 (2008) 2005~2007년 대구지역 대기 중 중금속의 시·공간적·일기유형별 특성 평가, 한국대기환경학회 2008 춘계학술대회 논문집, 361-362.
 황윤정, 이순진, 도화석, 이윤기, 손태정, 권택규, 박희욱, 김종우 (2009) 2008년 대구지역의 대기질 및 기상요인 특성 평가, 한국대기환경학회 2009 춘계학술대회

- 논문집, 465-466.
- Bahadur, R., G. Habib, and L.M. Russell (2009) Climatology of PM_{2.5} organic carbon concentrations from a review of ground-based atmospheric measurements by evolved gas analysis, *Atmospheric Environment*, 43(9), 1591-1602.
- Bäumer, D., B. Vogel, S. Versick, R. Rinke, O. Möhler, and M. Schaiter (2008) Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany, *Atmospheric Environment*, 42(5), 989-998.
- Berico, M., A. Luciani, and M. Formignani (1997) Atmospheric aerosol in urban area-measurements of TSP and PM₁₀ 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 concentrations of SO₂, O₃, PM₁₀, NO₂, CO in the urban area of Palermo, Italy, *Atmospheric Environment*, 41(14), 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.
- Heidi, O. (2000) Suspended particulate matter in indoor air: adjuvants and allergen carriers, *Toxicology*, 152, 53-68.
- 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(19), 2629-2641.
- SPSS (2006) SPSS® Base 14.0 Applications Guide.