

부산지역 PM10농도의 시간 및 공간적 변화 특성

전 병 일

신라대학교 환경공학과

(2003년 7월 18일 접수; 2003년 10월 4일 채택)

Characteristics of Spacio-Temporal Variation for PM10 Concentration in Busan

Byung-Il Jeon

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 18 July, 2003 ; accepted 4 October, 2003)

Hourly data of PM10 concentration collected from nine automatic air quality monitoring stations in Busan from 1999 to 2002 were analyzed to evaluate the spatio-temporal variation and meteorological characteristics of PM10 episodes in Busan metropolitan area. Mean concentrations ranged from $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ to $77\mu\text{g}/\text{m}^3$. For most stations, mean seasonal hourly concentrations are lowest in summer and highest in spring. PM10 episode above daily mean standard($150\mu\text{g}/\text{m}^3$) exhibited a maximum frequency at Gamjeondong and a minimum at Dongsamdong, and a maximum in March and a minimum in July and August. The diurnal variation of PM10 episode days is strongly influenced by traffic loads and meteorological conditions.

Key words : PM10 concentration, Meteorological characteristics, PM10 episode days

1. 서 론

입자의 크기가 $10\mu\text{m}$ 보다 작은 입자상 물질인 PM10은 에어로졸의 일종으로 도시지역에서 오존과 함께 최우선적으로 고려되는 오염물질로 알려져 있다. 에어로졸은 자연적이거나 인위적인 원인으로부터 유발되고 화학적 조성, 크기, 대기에서의 lifetime이 상당히 다르다. 미세먼지는 자연적으로 화산폭발, 자연적인 화재, 바람 등으로 인해 발생하고, 인위적으로 화석연료를 사용하는 연소시설, 유리 및 도자기 제조시설, 금속의 용융, 제련 및 열처리 시설, 석유화학제품 제조시설, 시멘트, 석회 제품 제조 시설 등과 자동차 배출가스 및 타이어 마모에서 배출된다.¹⁾

미세먼지는 주로 고체상이지만 액체상 물질로 이루어진 것도 있으며, 납, 구리, 아연, 카드뮴 등과 같은 중금속물질이 포함되어 있기도 하고 황산염, 질산염과 같은 산성물질이 함유되어 있기도 하다. 그

리고 입자가 미세하고 가벼워서 좀처럼 침강하기 어려워 장기간 대기 중에 떠다니기도 한다. 미세먼지는 스모그 원인물질로 기관지와 폐에 쌓여 천식, 호흡곤란을 일으킬 수 있으며, 계절에 따른 변화가 심해 난방기인 겨울철이 대체적으로 높으며, 강우량이 많은 여름철에는 낮은 수준을 보인다. 미세한 입자상물질이 대기 중에 부유할 때는 빛을 흡수, 산란시키기 때문에 시정을 악화시키고, 나무나 식물의 잎에 붙어 잎의 기공을 막고 햇빛을 차단하면서 동화작용, 호흡작용을 방해한다.^{2,3)}

부산지역에서의 대기오염에 관한 연구는 주로 오존에 치우쳐 있었다⁴⁻⁶⁾. 연안지역에 위치하고 있는 지형적인 영향으로 해륙풍이 발생하므로 이에 대한 연구가 진행되었다⁷⁾. 부산에서의 PM10에 대한 연구로서 low volume air sampler로 PM10을 포집하여 금속성분의 분석에 대한 연구는 있으나^{8,9)}, 시간별 자료를 이용하여 시간, 공간적인 연구를 구체적으로 연구한 예는 없는 실정이다.

1984년부터 주요도시의 총먼지(TSP) 오염도를 측정하기 시작하여, 1995년부터는 인체에 미치는 영향이 큰 미세먼지(PM10)를 측정하기 위하여 TSP

Corresponding Author : Byung-Il Jeon, Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone : +82-51-999-5056
E-mail : bijeon@silla.ac.kr

측정기를 PM10 측정기로 연차적으로 교체하기 시작하였으며, 2001년 1월 측정기 교체를 완료하고 미세먼지관리체제로 전환하였다¹⁰⁾. 부산의 경우, 1997년 1월 1일부터 주거지역인 덕천동과 상업지역의 범천동, 공업지역의 신평동에 대해 PM10 측정을 시작하여 2002년 말 현재 부산시내 총 13개 대기오염 자동측정소(자동차오염측정소 2개 포함)에서 측정하고 있다.¹¹⁾ 대기 위해성이 중요한 관심사가 됨에 따라 우리나라에서는 관리의 필요성이 감소되고 있는 TSP를 1987년에 PM10으로 대기환경기준을 대체한 미국 등 선진외국과 마찬가지로 2000년부터 오염물질 대상에서 삭제하고 지역환경기준에서도 PM10만을 지정하고 있다. 또한 1997년부터 미세분진의 인체 위해성을 고려하여 PM2.5의 기준을 제정하여 PM10과 함께 적용하고 있다. 우리나라의 PM10 환경기준은 연간평균치 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 평균치 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 지정하고 있다¹⁰⁾. 미국 캘리포니아 주가 연간 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 강한 기준을 사용하고 있으며, 미국 연방기준과 싱가포르의 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 지정되어 있다. 24시간의 경우 미국 캘리포니아 주는 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 미국 연방기준은 우리나라와 같이 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로, 세계보건기구(WHO)에서는 연간기준치는 지정하지 않고, 24시간 기준치를 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 지정하고 있다³⁾.

본 연구에서는 1999년부터 2002년까지 부산지역에서 측정된 시간별 PM10 농도를 이용하여 시간적, 공간적 농도특성을 고찰한 뒤, 일평균 농도가 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 고농도 PM10일을 추출하여 황사와 비황사시로 구분하여 그 특성을 알아보았으며, 마지막으로 부산지역 5개 지점에서 동시에 대기환경기준을 초과한 고농도 PM10 episode를 추출하여 기상학적인 접근으로 그 원인을 찾고자 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에 사용된 자료는 부산시가 관리하는 대기오염측정망 자료 중 PM10 농도로 1999년 1월 1일부터 2002년 12월 31일까지 측정된 시간별 자료이다. 자료의 신뢰도를 높이기 위해서 하루 24시간 관측자료 중 3분의 2에 해당하는 16시간 이상의 관측치가 있는 날만을 선택하여 분석하였다.⁷⁾ PM10을 기상학적으로 분석하기 위해서 부산지방기상청에서 관측한 풍향, 풍속, 강수량, 기온, 시정 자료를 이용하였다¹²⁾.

PM10의 측정은 β 선 흡수법(β -ray absorption method)을 사용하였다. 방사선의 일종인 β 선은 물질을 통과할 때 물질내의 전자와 산란, 충돌을 일으켜 흡수된다. 그 흡수량은 β 선의 에너지가 일정할 경우,

물질의 중량에 비례하며 먼지의 입경·성분·분산·색깔 등의 영향을 받지 않는다. 이 방법은 대기 중에 부유하고 있는 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자상물질만을 일정시간 여과지 위에 포집하여 낮은 에너지의 β 선을 투과시키고 그 물질의 질량에 비례하여 β 선의 흡수량이 증가하는 성질을 이용한 측정방법이다. 여과지 위에 포집한 부유입자상 물질에 β 선을 조사하여 투과된 β 선 강도를 측정함으로써 부유입자상 물질의 질량농도를 측정하는 것이다. 이 측정방법은 β 선을 방출하는 광원으로부터 조사된 β 선이 여과지 위에 포집된 분진을 통과할 때 소멸되는 β 선의 차로서 측정된다¹³⁾.

부산지역의 대기오염농도는 지역적 특성을 고려하여 주거지역으로 덕천동, 재송동, 연산동, 대연동의 4개 지점, 상업지역으로 범천동, 광복동의 2개 지점, 공업지역으로 신평동, 감전동의 2개 지점, 녹지지역으로 동삼동 모두 9개 지점에서 측정되고 있다. 최근에 강서구 대저동과 기장군 기장읍이 추가되었고, 자동차오염측정소로 동래구 온천동과 동구 초량동이 지정되어 있다(Fig. 1 참조).

3. 결과 및 고찰

3.1. 부산지역 PM10 농도의 일반적 특성

Table 1은 본 연구기간 동안 부산지역 9개 지점에서 측정된 PM10 농도의 지역별, 계절별 특성을 요약한 것이다. 전 지역의 평균농도의 범위는 $47\sim 77\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 그 편차가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이나 나타나 지역별 오염농도 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 공업지

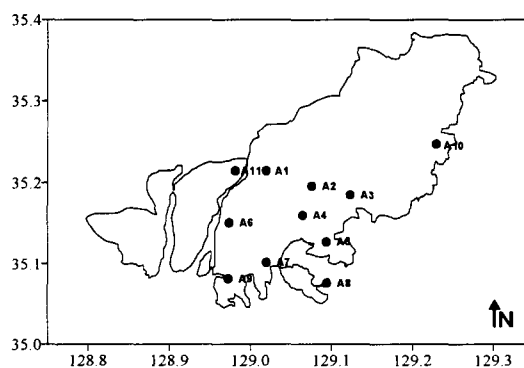


Fig. 1. Automatic air quality monitoring sites in Busan.

- A1: Deokcheondong, A2: Yeonsandong,
- A3: Jaesongdong, A4: Beomcheondong,
- A5: Daeyeondong, A6: Gamjeondong,
- A7: Kwangbokdong, A8: Dongsamdong,
- A9: Sinpyeondong, A10: Gijangueb,
- A11: Daejeodong.

Table 1. Mean and standard deviation based on hourly concentrations observed in Busan

| site | All data ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Mean \pm SD | Annual mean($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | | Seasonal mean($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | |
|---------------|--|---|------|------|------|---|------|------|------|
| | | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | Spr. | Sum. | Fall | Win. |
| Kwangbokdong | 58 \pm 44 | - | 49 | 57 | 65 | 70 | 46 | 55 | 52 |
| Beomcheondong | 60 \pm 43 | 59 | 54 | 55 | 74 | 72 | 54 | 55 | 55 |
| Yeonsandong | 60 \pm 44 | 57 | 62 | 54 | 68 | 79 | 51 | 53 | 56 |
| Daeyeondong | 76 \pm 51 | 85 | 76 | 65 | 77 | 95 | 64 | 65 | 73 |
| Jaesongdong | 59 \pm 43 | 47 | 56 | 59 | 74 | 68 | 50 | 55 | 62 |
| Dongsamdong | 47 \pm 42 | - | 36 | 43 | 60 | 56 | 37 | 45 | 48 |
| Sinpyeongdong | 75 \pm 57 | 79 | 75 | 71 | 77 | 94 | 52 | 75 | 78 |
| Gamjeondong | 77 \pm 60 | 85 | 80 | 69 | 76 | 89 | 55 | 79 | 84 |
| Deokcheondong | 64 \pm 49 | 61 | 63 | 63 | 67 | 85 | 51 | 52 | 66 |

역인 감전동과 신평동의 평균 농도는 각각 $77\mu\text{g}/\text{m}^3$, $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 높은 농도를 나타내었으며, 특히 주거지역인 대연동이 공단지역 못지않게 높은 농도 ($76\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타내었다. 녹지지역인 동삼동은 $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 배경지역에 비해 상대적으로 매우 농도를 나타내었는데, 이는 캐나다 밴쿠버 Lower Fraser Valley의 농도($12.8\sim 17.6\mu\text{g}/\text{m}^3$)¹⁴⁾에 비해 3배에 해당하는 값이다. 1999년부터 2002년까지 연도별 변화를 보면, 1999년과 2002년이 높게 나타났는데, 이는 중국으로부터 수송되는 황사의 발생빈도와 강도에 관계가 있는 것으로 판단된다. 공업지역인 신평동이 4년 연속 연간 대기환경기준치($70\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하였고, 감전동과 대연동이 2001년을 제외하고 대기환경기준치를 초과하였으며, 2002년에는 광복동, 연산동, 동삼동, 덕천동을 제외한 5개 지점에서 모두 대기환경기준치를 초과하였다. EPA 연평균 기준치인 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하였을 때, 부산지역의 농도는 건강에 우려할 정도로 높은 농도를 나타내었으며 녹지지역인 동삼동도 2002년 경우 이 기준을 달성하지 못하였다.

계절적으로 보면, 모든 지점에서 봄에 가장 높은 농도를 나타내었고 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이는 앞서서도 언급되었듯이 중국으로부터 빈번하게 수송되는 황사에 의해 봄철의 농도는 높았으며 여름철 몬순에 의한 잦은 강수와 강한 일사에 의한 대기 불안정에 따른 혼합층 고도의 상승

Table 2. Occurrence days of yellow sand in Busan for last 4 years(1999, 2000, 2001, 2002)

| Year | Date of yellow sand occurrence | Total |
|------|---|-------|
| 1999 | 1.25~28 | 4 |
| 2000 | 3.19 3.23~24 3.27 3.29 4.7~8 4.12~13 | 9 |
| 2001 | 1.2~3 3.3 3.6~7 3.20~23 4.10~14 4.24~25 5.16~19 12.13 | 21 |
| 2002 | 3.17~18 3.21~23 4.8~11 4.17 11.12 | 11 |

에 의해 여름철의 농도는 낮게 나타났다.^{15,16)} 서울의 경우, 겨울철에 PM10농도가 가장 높게 나타났는데, 이는 대기가 건조하고 난방을 위한 연료사용 증가와 대기안정도에 의한 지표역전층 형성과 혼합층 고도가 낮아지기 때문이라고 하였다.¹⁶⁾ Table 2는 1999년부터 2002년까지 최근 4년간 부산지역에서 발생한 황사의 발생현황을 나타낸 것이다. 1999년에 4일, 2000년에 9일, 2001년에 21일, 2002년에 11일로 총 45일이었으며, 최근 들어 봄이 아닌 겨울철인 1월, 12월 그리고 늦가을인 11월에도 황사가 발생하고 있어, 여름을 제외한 모든 계절에 황사가 발생할 수 있다는 것을 시사하고 있으며 부산지역도 황사에 의해 PM10 농도가 매우 큰 영향을 받는다고 할 수 있다.

Fig. 2는 최근 4년간 부산지역에서 측정된 PM10 농도의 월별 변화를 나타낸 것이다. Table 1에서와 같이 봄철이 높고 여름철이 낮은 농도 분포를 잘 나타내고 있다. 봄철의 PM10 농도는 황사의 영향으로 높은 농도를 나타내었고, 특히 2002년의 봄철이 다른 해보다 높게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 매년 11월부터 2월에 걸쳐 또 하나의 peak를 볼 수 있는

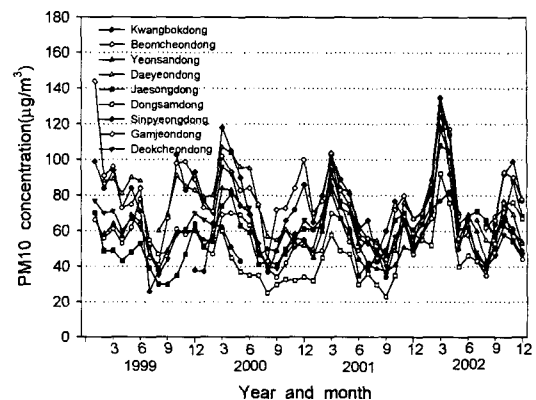


Fig. 2. Time series(1999~2002) plots of PM10 monthly average concentration in Busan.

데, 이는 대기가 건조하고 난방을 위한 화석연료 사용의 증가와 대기안정도에 의한 지표역전층 형성, 낮은 혼합고 등으로 발생한 것으로 판단된다. 그와 더불어 최근 겨울철에도 자주 발생하는 황사의 영향이 PM10농도를 상승시켰다고 할 수 있다. 황사의 영향을 받는 봄철을 제외하면, 여름철과 겨울철의 PM10 농도는 강수량과 밀접한 관계를 나타낸다고 볼 수 있다. 강수량이 많은 여름철에 PM10 농도는 낮았고 강수량이 적은 겨울철에 PM10농도가 높게 나타났다. 이는 먼지의 세정작용에 강수의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

3.2. 고농도 PM10 발생 특성

우리나라 대기환경기준치는 연간 평균 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 평균 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 규정하고 있으며, 본 연구에서의 고농도 PM10 발생일은 24시간 평균 기준치($150\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이상인 날을 선정하였다. Table 3은 부산지역 9개 지점에서 지난 4년간 일평균 농도가 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날을 추출하여 지역별, 월별로 그 특성을 나타낸 것이다. 괄호안의 값은 부산지역의 황사 발생일을 나타낸 것이다. 고농도 PM10이 가장 많이 발생한 지점은 공업지역인 감전동으로 62일이었으며, 신평동이 61일로 두 번째이었고 대연동이 43일로 세 번째이었고, 동삼동이 가장 적은 9일이었다. 감전동과 신평동의 경우, 황사에 의한 28일과 27일을 제외하면 고농도 PM10 발생일은 34일이었다. 재송동과 동삼동의 경우, 황사에 의하지 않고서는 고농도 PM10이 발생하지 않아 부산지역에서 비교적 농도가 낮은 지점이라고 할 수 있다. 월별로 보면, 황사가 가장 많이 발생한 3월이 96일로 전체의 35%로 가장 많았으며, 4월이 65일(24%)로 두 번째이었고, 1월이 36일(13%)로 세 번째이었

으며, 여름철인 7월과 8월은 단 하루도 고농도 PM10이 발생하지 않았다. 전체의 고농도 PM10 발생일 중에서 황사에 의한 영향을 제외한다면, 3월은 20일, 4월은 9일, 1월은 17일로 나타났으며, 2월, 6월, 9월, 10월, 12월은 황사의 영향 없이 고농도 PM10이 발생하였다. 따라서 황사에 의한 영향을 제외하면, 10월이 가장 많은 21일이었고, 다음이 3월이 20일, 1월이 17일, 6월이 16일 순이었다.

Table 4와 Table 5는 고농도 PM10 episode가 국지적인가 광역적인가를 조사한 것이다. Table 4는 황사발생일을 제외하고 조사한 것이고, Table 5는 황사발생일만을 대상으로 조사한 것이다. Table 4를 보면, 특정지역인 한 곳에서만 고농도 PM10이 발생한 빈도는 전체 고농도 PM10 발생일 51일 중 45%인 23일로 나타났으며, 2개 지역이 동시에 나타난 빈도는 33%인 17일이었으며, 3개 지역이 동시에 나타난 경우는 전체의 16%로 비교적 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 고농도 PM10 발생이 매우 국지적으로 나타날 가능성이 높다는 것을 암시한다. 드문 경우지만 5개 지역 이상에서 동시에 고농도를 나타낸 날이 3일로서 2000년 5월 1일, 2002년 1월 13일, 2002년 10월 4일이었다. 이중 2000년 5월 1일과 2002년 1월 13일은 고농도 PM10 episode로 선정하여 3.4절에서 사례연구를 하였다.

Table 5는 부산지역에 황사가 발생한 날만을 대상으로 조사한 것으로 황사가 발생하였으면서도 고농도 PM10을 기록하지 못한 경우가 14일로 전체의 31%이었으며, 한 곳에서만 고농도 PM10을 나타낸 빈도는 7일로 16%이었으며, 6개 지점 이상에서 고농도 PM10을 나타낸 경우가 16일로 전체의 36%를 나타내었다. 9개 지점 전체가 고농도 PM10을 나타낸 경우가 전체의 13%인 6일이 나타났는데, 2001년

Table 3. Occurrence frequency of PM10 episode day(daily mean $\geq 150\mu\text{g}/\text{m}^3$) at air quality monitoring sites in Busan for last 4 years (1999, 2000, 2001, 2002). The values in parenthesis are number of Yellow sand occurrence in Busan

| Site | Month | | | | | | | | | | | | Total |
|---------------|------------|---|------------|------------|-----------|----|---|---|---|----|-----------|----|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| Kwangbokdong | 1 | | 6(6) | 5(5) | 1(1) | 1 | | | 1 | 1 | 1(1) | | 17(13) |
| Beomcheondong | 2(1) | | 7(6) | 7(6) | | 3 | | | 1 | 2 | 1(1) | | 23(14) |
| Yeonsandong | | | 9(9) | 5(4) | 3(1) | | | | | | 1(1) | | 18(15) |
| Daeyeondong | 4(3) | | 15(12) | 11(9) | 3(1) | 6 | | | | 3 | 1(1) | | 43(26) |
| Jaesongdong | 2(2) | | 5(5) | 3(3) | 1(1) | | | | | | 1(1) | | 12(12) |
| Dongsamdong | | | 5(5) | 3(3) | 2(2) | | | | | | 1(1) | | 9(9) |
| Sinpyeondong | 9(4) | | 19(10) | 11(9) | 4(2) | | | | | 10 | 3(1) | 4 | 61(27) |
| Gamjeondong | 13(5) | 2 | 19(13) | 10(8) | 2(1) | 5 | | | | 5 | 1(1) | 5 | 62(28) |
| Deocheondong | 5(4) | 1 | 11(10) | 10(9) | 1 | 1 | | | | | 1(1) | | 31(25) |
| Total | 36 (19) | 3 | 96 (76) | 65 (56) | 17 (9) | 16 | | | 2 | 21 | 11 (9) | 9 | 276 (169) |

Table 4. Frequency of a high PM10 episode site above the standard(daily mean $\geq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) for 1 day at air quality monitoring site in Busan for last 4 years(1999, 2000, 2001, 2002) in case non-yellow sand day

| Sta. No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Total |
|----------|----|----|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| 1999 | 15 | 11 | 3 | | | | | | | 29 |
| 2000 | 5 | 3 | 3 | | 1 | | | | | 12 |
| 2001 | | | | | | | | | | |
| 2002 | 3 | 3 | 2 | | 1 | 1 | | | | 10 |
| Total | 23 | 17 | 8 | | 2 | 1 | | | | 51 |

Table 5. Frequency of a high PM10 episode site above the standard(daily mean $\geq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) for 1 day at air quality monitoring site in Busan for last 4 years(1999, 2000, 2001, 2002) in case yellow sand day

| Sta. No. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Total |
|----------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| 1999 | 1 | | | 1 | 1 | | 1 | | | | 4 |
| 2000 | 2 | 2 | | | 2 | 1 | 1 | | 1 | | 9 |
| 2001 | 11 | 4 | | | 1 | | 2 | 2 | | 1 | 21 |
| 2002 | | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | 2 | 5 | 11 |
| Total | 14 | 7 | 1 | 1 | 5 | 1 | 5 | 2 | 3 | 6 | 45 |

3월 7일, 2002년 3월 21일과 22일, 2002년 4월 8일부터 10일까지 3일간 연속으로 나타났다.

3.3. 부산지역 PM10 농도의 일변화

Fig. 3은 부산 지역을 대표하는 지점 4곳(녹지지역인 동삼동, 주거지역인 덕천동, 상업지역인 범천동, 공단지역인 신평동)을 선정하여 계절별 일변화를 나타낸 것이다.

동삼동은 부산의 최남단의 해안지역에 위치하며 먼지 발생원으로 연안을 드나드는 선박이 주된 오염원이다. 농도의 일변화를 보면, 봄철(7시)을 제외하고 최고농도가 나타낸 시각은 오전 9시이며, 최저농도가 나타낸 시각은 15~16시로 나타났으며, 21시

이후부터 새벽 5시까지 일정한 농도를 유지하다가 새벽 6시 이후에 증가하여 오전 9시경에 최대 농도를 나타내었다. 덕천동은 부산시의 북부지역에 위치하며 서쪽에 낙동강이 흐르며 주위에 주택단지가 있고, 남해고속도로의 영향으로 교통량이 많은 편이다. 농도의 일변화를 보면, 오전 9시에서 11시 사이에 최대농도가 나타나고, 그 외 시간대에는 비슷한 농도를 유지하고 있다. 최대농도 발생시각이 여름에는 오전 9시, 봄에는 오전 10시, 가을과 겨울에는 오전 11시로 1시간씩 지연되어 나타났다. 이는 혼합고의 성장에 따른 잔류층 오염물질의 하강이 계절에 따라 늦어지면서 나타나는 것과 출근차량에 따른 rush-hour가 계절에 따라 지연되는 것에 의해 발생

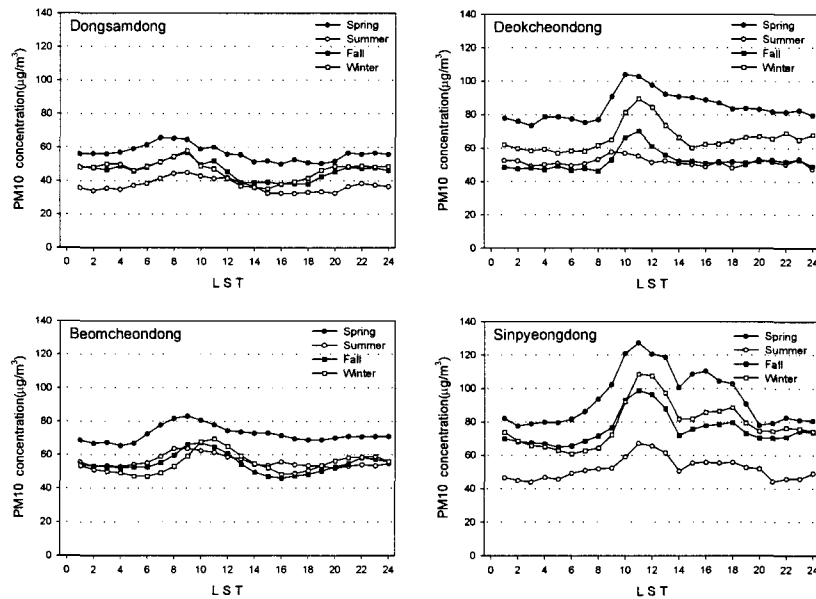


Fig. 3. Diurnal variations of seasonal mean PM10 concentration at 4 sites in Busan. (A: Dongsamdong, B:Deokcheondong, C:Beomcheondong, D: Sinpyeongdong)

하는 것으로 판단된다¹⁷⁾. 범천동은 부산의 상가가 밀집되어 교통량이 많은 서면 부근에 있는 지점이다. 최고농도가 나타난 시각은 봄과 여름이 오전 9시, 가을이 오전 10시, 겨울이 오전 11시로 나타나 주거지역인 덕천동과 비슷하게 나타났다. 최저농도는 16시경에 나타났으며 22시부터 농도가 약간 상승하여 새벽 2시까지 지속되었다. 신평동은 부산의 대표적인 공업지역으로 주위에 많은 공장들이 산재하고 있다. 최고농도는 4계절 모두 오전 11시에 나타났으며, 14시에 급격히 하강하였다가 다시 16~18시경에 2차 peak가 발생하였으며, 21시 이후부터 새벽까지 일정한 농도를 유지하였다. 14시경에 급격히 농도가 하강한 것은 대류가 활발하여 농도가 확산되는 것과 자동차 통행량의 일시적인 감소가 원인인 것으로 판단된다. 공업지역의 먼지가 시간대에 따른 농도변화가 심하게 나타나는 이유는 공업지역의 특성상 대형차량의 빈번한 출입이 농도변화에 상당한 영향을 주고 있기 때문으로 판단된다.

하루 중 최고농도와 최저농도의 차이를 보면 여름철이 가장 낮았으며, 봄과 겨울의 편차가 가장 크게 나타났다. 이는 먼지의 배출량의 차이와 기상학적 특성에 의해 야기된 것으로 보이며, 편차가 가장 큰 지역은 공업지역인 신평동이었으며 가장 작은 지역은 녹지지역인 동삼동이었다. 시간평균농도는 대기안정도나 배출량에서 단기간의 변동성과 관련된 오염농도의 변화를 가장 잘 나타낼 수 있다. 대부분의 경우 새벽 4~6시와 오후 4~5시경에 PM10 농도가 최저이고 오전 7시부터 서서히 증가해서 오전 9시에서 11시 사이에 극값에 도달하고 다시 감소하였다가 18시 이후부터 자정까지 점차 증가하는 경향을 보이는 2개의 peak를 보이는 형태를 보이고 있다. 이는 아침 출근 시간 전후로 PM10농도가 높았다가 저녁 퇴근 시간 무렵에 다시 높아지는 것으로 해석할 수 있다. 아침 출근 시간은 일정한 반면, 저녁 퇴근 시간은 일정하지 않으므로 나타나는 것으로 보인다^{16,18)}. 야간에 PM10 농도가 높은 상태가 지속되는 또 다른 이유는 야간에 지표냉각으로 인

해 낮 동안에 형성되었던 혼합층의 고도가 낮아지고 접지역전층이 형성되기 때문이다. 농도의 일변화는 계절에 따른 뚜렷한 특징보다는 각 관측지점의 교통량이나 인구밀도, 활동시간 등 주변 환경에 의한 영향을 더 많이 받는 것으로 보이며 이런 주변 자료에 대한 고찰이 필요하다¹⁶⁾.

3.4. 부산지역 고농도 PM10 발생의 사례연구

3.4.1. 2000년 5월 1일의 경우

2000년 5월 1일은 부산지역 9개 지점 중 5개 지점에서 동시에 일평균 환경기준치($150\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하여 나타났다. 초과현황을 보면 덕천동 $269\mu\text{g}/\text{m}^3$, 대연동 $175\mu\text{g}/\text{m}^3$, 감전동 $171\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산동 $165\mu\text{g}/\text{m}^3$, 신평동 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. Fig. 4는 2000년 5월 1일과 5월 2일의 지상일기도를 나타낸 것이다. 5월의 1일의 기압배치는 1012hPa의 고기압이 동지나해에 위치하며 1006hPa와 1008hPa의 저기압이 발해만과 동해에 위치하면서 부산지방은 안상부형의 기압배치하에 있었으며, 5월 2일은 동해상에 발달되어 있는 1004hPa 저기압의 영향을 받고 있다.

Fig. 5는 2000년 5월 1일과 5월 2일의 부산지역에서 측정된 시간별 PM10 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 5월 1일 오전 9시 이후 PM10농도는 급격히 상승하기 시작하여 오전 11시에 광복동 $125\mu\text{g}/\text{m}^3$, 동삼동 $73\mu\text{g}/\text{m}^3$, 12시에 대연동 $247\mu\text{g}/\text{m}^3$, 범천동 $196\mu\text{g}/\text{m}^3$, 재송동 $293\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 13시에 감전동 $223\mu\text{g}/\text{m}^3$, 덕천동 $324\mu\text{g}/\text{m}^3$, 14시에 신평동 $235\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산동 $267\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하였다. 이 시간 이후 농도는 서서히 하강하기 시작하여, 연산동, 동삼동, 광복동, 범천동, 대연동은 15~17시경에 최저농도를 나타내었지만, 재송동, 신평동, 덕천동, 감전동은 위치점과 달리 계속 농도가 증가하여 17~20시경에 2차 peak를 나타내었다. 또한 15~17시경에 최저농도

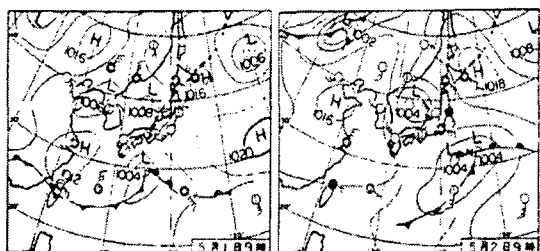


Fig. 4. Surface weather chart at 0000UTC May 1~2, 2000.

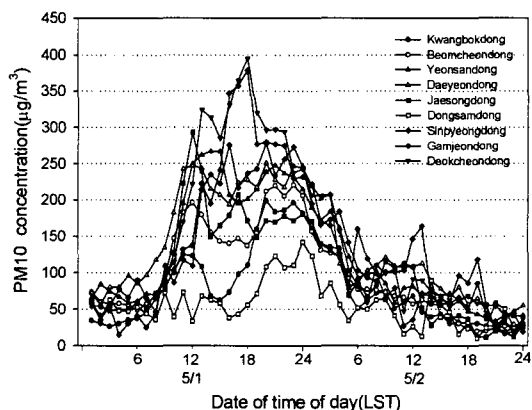


Fig. 5. The diurnal variation of PM10 on May 1~2, 2000 in Busan.

를 나타내었던 지점들은 그 이후 계속 상승하여 20~23시경에 2차 peak를 나타내었다. 5월 2일 1시 이후 부터는 부산지역 모든 지점들이 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 저농도를 나타내어 고농도 PM10은 종료되었다.

대체로 Fig. 3에서와 같이 일중 PM10농도는 9~11시경에 최고농도를 나타내고 16시경에 최저농도 그리고 저녁 21시경에 2차 peak를 나타내는 것이 일반적인 양상인데, 본 사례일에서는 최저농도를 나타낼 시간대인 16시경에 최고농도를 나타낸 곳이 공업지역인 신평동과 감전동을 포함하여 덕천동과 재송동에서 발생하였고, 최저농도를 나타낸 나머지 지점의 농도가 대부분 녹지지역인 동삼동을 제외하고 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하여 발생하였다. 이는 고농도를 발생시키는 요인이 작용하였다고 볼 수밖에 없다. 대기오염농도를 결정하는 인자에는 대기오염배출량, 기상상태, 지형적인 조건 등을 들 수 있다. 5월 1일이 월요일로 특별히 자동차 통행량이 급증하였다고 볼 수 없고, 지형적인 조건이 변하지 않았다면 기상상태의 영향을 가장 큰 요인으로 볼 수밖에 없다. 인위적인 배출량이 특정 지역에서 일정하다면, PM10농도의 변화는 부분적으로 기상학적 조건의 변화에 의해 일어날 수 있다. 기상학적 조건에 따른 PM10농도의 변화는 여러 나라에서 찾을 수 있다. 대만에서는 무강수일과 PM10 농도의 관계를 나타내었고¹⁹⁾, 네덜란드에서는 기온과 풍속이 주요한 인자로 대두되었고²⁰⁾, 홍콩에서는 몬순과 강수효과가²¹⁾, 싱가포르에서는 풍향과 풍속이 중요한 변수로 작용하였다²¹⁾. 일본에서의 겨울철의 고농도 PM10농도는 중앙아시아에서 발생한 먼지폭풍과 강안정도에 의해 영향을 많이 받는 것으로 나타나²³⁾, PM10농도는 방출물 뿐만 아니라 기상조건에 의해서도 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 본 사례일인 5월 1일과 5월 2일의 풍향,

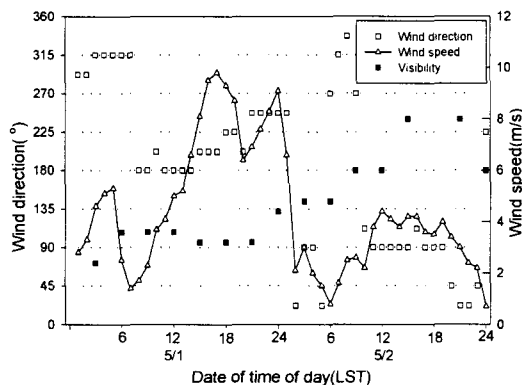


Fig. 6. The diurnal variation of meteorological parameter on May 1~2, 2000 in Busan.

풍속 그리고 시정을 나타낸 것이다. 5월 1일의 경우 오전 7시경까지 육풍인 북서풍계열의 바람이 있었고 오전 8시경부터 해풍인 남풍계열로 바뀌면서 일시적으로 2m/s이하의 바람으로 약화되었고, 이 시각 이후부터 남~남서풍 계열의 해풍이 5월 2일 새벽 1시까지 강하게 나타났다. 특히 16시부터 18시까지의 풍속은 9m/s를 넘는 강풍이 있었다는 것을 알 수 있다. 특히 이 시간대의 일반적인 형태는 농도의 하강이 일어나는 시간대이지만 공단지역을 중심으로 고농도가 발생하였는데, 이는 먼지의 재비산으로 인해 농도가 상승하여 일중 고농도 PM10을 유지한 것으로 판단된다. 5월 1일 야간의 경우에서도 rush-hour 때의 자동차 통행에 의한 먼지 증가와 강풍으로 인한 먼지의 재비산 등으로 계속해서 고농도를 유지하였으며, 5월 2일 오후 2시 이후 풍향이 북서풍 내지 북동풍계열로 변하면서 풍속도 약해졌고 따라서 PM10농도가 감소하기 시작하였다. 5월 1일 고농도를 나타낸 날의 시정은 일중 10km 미만을 기록하여 먼지의 영향으로 인해 시정이 매우 악화되었던 것으로 보인다.

3.4.2. 2002년 1월 12일~13일의 경우

2002년 1월 12일은 공단지역인 신평동과 감전동의 일평균 PM10농도가 각각 $166\mu\text{g}/\text{m}^3$, $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 대기환경기준을 초과하였으며, 1월 13일은 주거지역인 연산동과 재송동, 녹지지역인 동삼동을 제외한 6개 지점에서 대기환경기준을 초과하여 나타났다. Fig. 7은 2002년 1월 12일~13일의 기상일기도를 나타낸 것이다. 부산지역은 남해상에 중심을 둔 이동성고기압의 영향으로 12일의 최고기온은 16.2°C, 최저기온은 6.4°C로 일교차가 9.8°C로 겨울날씨 같지 않은 매우 포근하였으며, 13일도 최고기온 12.7°C, 최저기온 10.5°C으로 고온현상이 지속되었다.

Fig. 8은 2002년 1월 12일~13일의 부산지역 PM10농도의 일변화를 나타낸 것이다. 비교적 고농도를

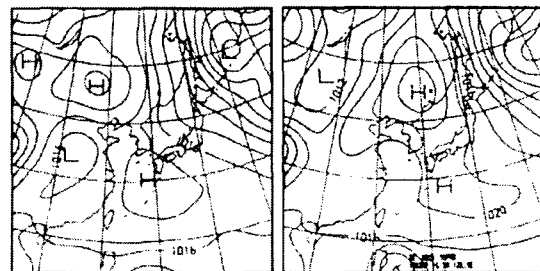


Fig. 7. Surface weather chart at 0000UTC Jan. 12 (left)~13(right), 2002.

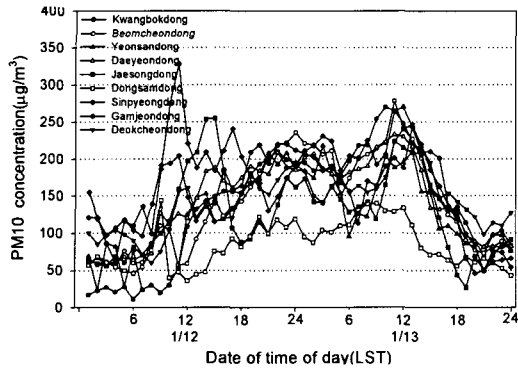


Fig. 8. The diurnal variation of PM10 on Jan. 12~13, 2002 in Busan.

나타낸 신평동의 경우, 1월 12일 오전 11시에 최고 농도인 $328\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었고, 14시와 17시에도 각각 $209\mu\text{g}/\text{m}^3$, $241\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약한 peak를 나타내었으며, 17시 이후 지속적으로 하강하여 21시의 $130\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 최저점으로 1월 13일 새벽까지 고농도를 지속적으로 나타내었다. 재송동은 신평동과 3시간 정도의 시간차로 지연현상을 보이면서 비슷한 일변화를 나타내었다. 신평동과 재송동을 제외한 모든 지점들은 1월 12일 14시 이후 약간씩의 굴곡은 있지만, 1월 13일 새벽 3시까지 지속적으로 농도가 상승하고 있다. 그리고 1월 13일 새벽 5~6시경에 일시적인 하강을 한 후 다시 상승하여 11~13시경에 최대농도를 나타내었으며, 그 이후는 농도 계속 하강하였다. 이 사례는 2000년 5월 1일의 경우와는 달리, 1월 12일 야간과 13일 새벽에 걸쳐 지속적으로 고농도를 유지하였고, 13일 새벽 5~7시경의 일시적인 하강 외는 1월 13일 15시까지 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도를 유지하였다.

Fig. 9는 본 사례일인 1월 12일과 1월 13일의 풍향, 풍속 그리고 시정을 나타낸 것이다. 1월 12일 새벽부터 남서풍 내지 북서풍 계열의 바람이 3~4m/s 내·외의 풍속을 유지한 채 지속적으로 불고 있었다(Fig. 9 참조). 특히 1월 12일 야간과 13일 새벽에는 1~2m/s 내·외의 약한 바람이 있었고 중층운과 하층운의 영향으로 야간복사냉각이 적어 최저기온이 10.5°C 정도로 매우 높은 기온을 유지한 채 먼지가 침적하지 않고 계속 대기 중에 부유하여 PM10 농도가 지속적으로 상승하였다고 할 수 있다. 또한 1월 13일 오전에도 3~4m/s의 약한 동풍계열로 풍향이 바뀌었으나, 차량통행에 의한 먼지의 영향으로 고농도가 지속되었던 것으로 보인다. 그러나 13일 16시 이후 5m/s 정도의 강한 동풍이 불면서 대기 중 먼지의 농도는 급격히 하강하여 고농도 PM10은 중

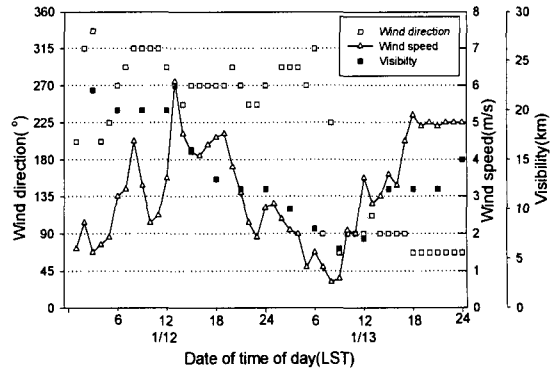


Fig. 9. The diurnal variation of meteorological parameter on Jan. 12~13, 2002 in Busan.

료되었다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 1999년부터 2002년까지 부산지역에서 측정된 시간별 PM10 농도를 이용하여 시간적, 공간적 변동을 고찰하고, 고농도 PM10일을 추출하여 황사와 비황사시로 구분하여 그 특성을 알아보고, 마지막으로 부산지역 5개 지점에서 동시에 대기환경기준을 초과한 고농도 PM10 episode 특성을 고찰하였으며, 그 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부산 지역의 PM10의 평균농도 범위는 $47\sim77\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 공업지역인 감전동과 신평동 그리고 주거지역인 대연동이 각각 $77\mu\text{g}/\text{m}^3$, $75\mu\text{g}/\text{m}^3$, $76\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며, 녹지지역인 동삼동은 $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 계절적으로 모든 지점에서 봄에 가장 높은 농도를 나타내었으며, 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다.
- 2) 24시간 평균기준치($150\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이상인 고농도 PM10이 가장 많이 발생한 지점은 공업지역인 감전동으로 62일이었으며, 신평동이 61일로 두 번째이었고 대연동이 43일로 세 번째이었고, 동삼동이 가장 적은 9일이었다. 월별로 보면, 황사가 가장 많이 발생한 3월이 96일로 전체의 35%로 가장 많았으며, 4월이 65일(24%)로 두 번째이었고, 1월이 36일(13%)로 세 번째이었고, 여름철인 7월과 8월은 단 하루도 고농도 PM10이 발생하지 않았다. 황사 발생일의 경우에 고농도 PM10이 여러 지점에서 동시에 발생하였고, 비황사일의 경우는 대부분 3개 지점 이하에서 고농도 PM10이 발생하였다.
- 3) PM10농도의 일변화는 새벽 4~6시와 오후 4~5시경에 최저농도를 보였고 오전 9시부터 11시 사이에 극값에 도달하고 다시 감소하였다가 18시

- 이후부터 자정까지 점차 증가하는 경향을 보이는 2개의 peak를 보이는 형태를 보이고 있다.
- 4) 부산지역 9개 지점 중 5개 지점에서 동시에 고농도 PM10을 나타낸 2000년 5월 1일의 고농도 발생 원인은 야간의 강풍에 의해 먼지가 재비산되면서 지속적으로 고농도가 유지된 것으로 판단되며, 2002년 1월 13일의 경우는 앞의 사례와 반대로 1월 12일 야간과 13일 새벽의 약한 바람과 중층운과 하층운의 영향으로 야간복사냉각이 적어 최저기온이 10.5°C 정도로 매우 높은 기온을 유지한 채 먼지가 침적하지 않고 계속 대기 중에 부유하여 농도가 지속적으로 상승하였다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1) Pope, C. A., D. W. Dockery and J. Schwartz, 1995, Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution, *Inhalation Toxicology*, 7, 1-18.

2) Dockery, D. W., C. A. Pope, X. Xu, J. D. Spengler, J. H. Wear, M. E. Faye, B. G. Ferris and F. E. Speizer, 1993, An association between air pollution and mortality in six U. S. cities, *New Engl. J. mED.*, 329, 1753-1759.

3) Pryor, S. C. and R. J. Barthelme, 1996, PM10 in Canada, *The Science of the Total Environment*, 177, 57-71.

4) 전병일, 1997, 부산연안역의 고농도 오존일의 예측기법개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 대학원 박사학위논문, 119pp.

5) 전병일, 1999, 부산연안역의 야간 고농도 오존 발생특성과 기상학적 관련성, *한국환경과학회지*, 8(3), 287-292.

6) 전병일, 2001, 부산연안역의 대기경계층내 잔류오존의 연직하향혼합에 의한 지표 오존농도의 변화 특성, *한국환경과학회지*, 10(6), 417-422.

7) 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 해풍이 부산지역의 대기오염농도에 미치는 영향, *한국환경과학회지*, 3(4), 357-365.

8) 전병일, 2003, 2002년 부산지역 황사/비황사시 PM10 중의 중금속 농도 특성, *환경영향평가*, 12(2), 99-108.

9) 황용식, 전병일, 2003, 부산 서부지역의 대기 중 PM10 농도와 화학적 조성, *한국환경과학회지*, 12(6), 627-633.

10) 환경부, 2002, 환경백서, 718pp.

11) 부산광역시, 2002, 2002 환경백서, 367pp.

12) 기상청, 일기상통계표(1999, 2000, 2001, 2002).

13) 생산기술연구원, 1992, 대기오염자동측정기의 이론과 실무, 580pp.

14) McKendry, I. G., 2000, PM10 levels in the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada: An overview of spatiotemporal variations and meteorological controls, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 50, 443-452.

15) 이태정, 김동술, 1997, 수원지역 입자상물질의 오염원 기여도 추정, *한국대기보전학회지*, 13(4), 285-296.

16) 진윤하, 구해정, 김봉만, 김용표, 박순웅, 2003, 한반도 11개 도시의 1995~2000년 PM10농도 변화 경향, *한국대기환경학회지*, 19(2), 231-245.

17) 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 부산지역의 SO₂ 농도 변화 특성에 관한 고찰, *한국대기보전학회지*, 10(4), 245-251.

18) 김우규, 전영신, 이원환, 김현미, 1995, 서울 부유분진 농도와 황사 특성에 관한 사례 연구, *한국대기보전학회지*, 11(2), 199-209.

19) Yang, K. L., 2002, Spatial and seasonal variation of PM10 mass concentration in Taiwan, *Atmos. Environ.*, 36, 3403-4311.

20) Van der Wal, J. T. and L. H. J. M. Janssen, 1996, How contribute emission of PM10 and meteorology to concentrations of fine particles in the Netherlands, *Journal of Aerosol Science*, 27, S681-S682.

21) Qin, Y., C. K. Chan and L. Y. Chan, 1997, Characteristics of chemical compositions of atmospheric aerosols in Hong Kong: spatial and seasonal distributions, *The Science of the Total Environment*, 206, 25-37.

22) Orlic, I., X. Wen, T. H. Ng and S. M. Tang, 1999, The years of aerosol pollution monitoring in Singapore: a review, *Nuclear Instruments and Methods in Reasearch B*, 150, 457-464.

23) Var, F., Y. Narita and S. Tanaka, 2000, The concentration, trend and seasonal variation of metals in the atmosphere in 16 Japanese cities shown by the results of National Air Surveillance Network(NASN) from 1974 to 1996, *Atmos. Environ.*, 34, 2755-2770.