

KZ 필터링 및 중회귀 모델을 이용한 서울지역 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 장기추세

대기환경팀

안미진 · 이상열 · 김두래 · 이용민 · 정 권 · 김주형

Long-Term Trend of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentration in Seoul through an Adjustment of KZ Filtering and a Multi-Regression Model

Atmospheric Environment Team

**Mi-jin Ahn, Sang-yeol Lee, Doo-rae Kim, Yong-min Lee, Gweon Jung
and Joo-hyung Kim**

Abstract

Fine particulate matters, including PM₁₀ and PM_{2.5}, have attracted a great deal of attention from air quality managers due to their adverse impacts on human health and the environment. In order to assess the changes in air quality for pollutant reduction strategies, the long-term trends of fine particulate matters need to be examined, with least variability, and without the effect of meteorological variables. In this article, an adjusted KZ filter method, which is known as a useful tool for the removal of the influence of meteorological variables, was applied to the PM₁₀ and PM_{2.5} data measured in Seoul between Jan. 2000 and Dec. 2008. A multi-regression model was also applied to explain the temporal trends. The long-term PM₁₀ concentration data showed strong fluctuation, which was due to increases in the coarse particle fraction. Conversely, the long-term PM_{2.5} concentration data showed a moderate downward trend after 2004. A comparison of the PM₁₀ and PM_{2.5} concentration data, both before and after adjustment for meteorological effects, suggested that the long-term trends were more affected by other factors than the short-term meteorological variation.

Key words : PM₁₀, PM_{2.5}, KZ filter, multi-regression model

서 론

미세먼지로 불리는 PM_{10} 은 비교적 대기 중 체류 기간이 길며 호흡기나 심장 질환이 있는 어린이나 노인 등에게 직접적으로 건강에 영향을 미칠 수 있고 시정장애를 일으킬 수 있는 물질이다. 초미세먼지로 불리는 $PM_{2.5}$ 는 주로 자동차 배기가스 및 화석연료로부터 배출되며 그 크기로 인해 폐질환, 심장병 등 인체영향이 PM_{10} 보다 훨씬 크다. 또한 사망률과의 관계가 다른 대기오염물질보다 더 높다고 보고되고 있다(1).

서울시에서는 1995년부터 PM_{10} 농도를, 2000년부터 $PM_{2.5}$ 농도를 모니터링하기 시작하였다. 이들의 주요 배출원을 자동차로 보고 경유차 저공해화 및 노후 차량 폐차 추진, 천연가스 버스 보급 및 충전소 확대, 저공해자동차 개발 유도 및 확대 보급 등의 미세먼지 저감정책을 적극적으로 추진해오고 있다(2).

효율적인 저감대책을 세우기 위해서는 배출량 저감에 따른 대기오염도 개선 효과를 찾아내는 것이 필요하다. 그러나 가시적으로 현저하게 배출량을 저감할 수 있는 상황은 아니고 기상조건의 변동성에 의해 배출량 변동은 감춰지기 쉬워서 현실적으로 정확한 배출량 저감에 따른 오염도 자료를 산출하기란 쉽지 않다(3).

2008년의 경우 서울시가 미세먼지를 측정할 이래 가장 낮은 수치를 기록하였다. 2003년 이후 고농도 일수는 감소하고 저농도 일수는 증가하는 추세이다. 그러나 이것이 과연 미세먼지 배출량 저감 정책의 결실인지 우호적인 기상요건의 영향인지를 구분할 필요가 있다.

대기오염도의 장기추세를 분석하고자 하는 여러 방법 중에서 Rao and Zurbenko(4)는 기상인자의 영향을 제거한 오존농도의 장기추세 분석에 Kolmogorov-Zurbenko(KZ) 필터법을 처음 사용하였다. 국내에서도 허(5), 김 등(6)이 서울 및 부산지역의 오존농도 장기추세분석을 위해 KZ 필터법을 적용하였다. 이후 Wise and Comrie(7)는 오존 뿐 아니라 미세먼지의 장기추세 분석에 KZ 필터법을 적용하였다. 국내에서도 이 등(8)이 KZ 필터법을 이용한 서울시 미세먼지의 장기변화분석

을 시도하였다.

대기오염도에 영향을 미치는 기상요소는 매우 다양하고 또 복잡하게 거동하기 때문에 적용하기 쉽지 않으나 비교적 대기오염도와 상관성이 높은 기상요소를 선택하게 된다. 이중 하층대기안정도는 연직 환기 효과와 연관되는 인자로 일변화를 하는 혼합고 대신 하루를 하나의 인자로 표현할 수 있는 장점이 있다(9).

본 연구는 서울지역 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 미칠 수 있는 요소 중 기상영향을 배제한 장기추세 분석을 통해 미세먼지 저감정책의 효과를 추론해보고자 하였다. 이를 위해 KZ 필터법을 적용하여 2000년대 이후 서울지역 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도의 장기추세를 분석하였다. 또한 중회귀 분석을 함께 적용하여 풍속, 온도 및 하층대기안정도의 영향을 배제한 조건에서 장기변동추세를 파악하였다.

연구 방법

1. 사용한 자료

2000년에서 2008년까지 9년간 서울시 도시대기 자동측정망 및 기상청 오산 고층 관측소에서 측정된 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 자료와 풍속 및 기온, 표준등압면고도에 따른 온도에 근거하여 계산한 하층대기안정도를 사용하였다. 단, $PM_{2.5}$ 는 충분한 자료를 축적하기 시작한 2003년부터 자료를 이용하였다. 또한 미세먼지 중 조대입자를 PM_{10} 에서 $PM_{2.5}$ 를 뺀 차이, $PM_{10-2.5}$ 로 정의하였다.

서울시보건환경연구원에서 운영하는 서울시도시대기자동측정망은 현재 총 27개로서 25개 구에 하나 이상의 측정소를 설치하여 운영하고 있다. 월 2회 이상 자체적으로 기기 교정 및 정도검사를 실시하고 있다. 1년에 한번 산업기술시험원이나 환경관리공단에 의뢰하여 기기 정도검사를 실시하고 있다.

PM_{10} 및 $PM_{2.5}$, 풍속 및 기온 자료는 전 측정소에서 매시간 관측한 시간자료를 산술평균한 일평균을 일 대푯값으로 하였다. 특이기상현상으로 단기간 큰 영향을 미치는 황사일의 미세먼지 자료는

제외하였다.

하층대기안정도는 기상청의 오산 고층 관측소에서 관측한 고층의 표준등압면고도에 따른 기온 자료를 이용하여 1,000 hpa 공기괴를 단열과정을 통해 850 hpa까지 상승시켰을 때 변화된 온도와 본래의 850 hpa 고도의 기온과의 차이로 산출하였다. 이 값이 클수록 하층대기가 안정함을, 작을수록 불안정함을 의미한다.

2. KZ 필터링 및 중회귀 모델

Rao and Zurbenko(4)는 오존의 시계열분석을 위해 이동평균을 반복 산출하는 방식으로 단기성분을 제거하고 장기성분을 추출하는 KZ 필터링을 처음 사용하였다. 이 후 Wise and Comrie (7)는 미세먼지 시계열의 추세분석에 이 방법을 응용하였다. 이들에 의하면 미세먼지농도의 원시계열 자료는 3개의 시계열성분의 합으로 구성되며, 다음 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X(t) = b(t) + W(t) \quad (1)$$

$$b(t) = L(t) + S(t) \quad (2)$$

여기서 $X(t)$ 는 원시계열, $b(t)$ 는 기준변동으로서 장기 기후변화나 정책에 기인한 장기변동추세인 $L(t)$ 와 태양주기에 의한 계절 변동인 $S(t)$ 의 합이며, $W(t)$ 는 단기 기상에 의한 변동 성분이다.

m 일간의 이동평균을 p 회 반복하는 $K(m,p)$ 에 의한 X 의 이동평균은 식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$X_t^{i+1} = \frac{1}{m} \sum_{j=-k}^k X_{t+j}^{(i)} \quad (3)$$

여기서 $m = 2k + 1$ 이며, 약 $m \times p^{\frac{1}{2}}$ 이하의 기간을 필터링해준다(10).

본 연구에서는 Wise and Comrie(6)의 방법과 같이 미세먼지의 원시계열에 KZ(15,5) 필터링을 적용하여 단기변동을 제거한 기준변동 $b(t)$ 를 구하였다. 다음으로 KZ(365,3) 필터링을 적용하여 장기변동 $L(t)$ 를 구하였다. 기준변동 $b(t)$ 에서 장기변동 $L(t)$ 를 빼서 계절변동 $S(t)$ 를 산출한다.

또한 원시계열에서 기준변동 $b(t)$ 를 빼면 단기

변동 $W(t)$ 도 산출한다.

또한 기상요소가 미세먼지에 미치는 영향을 배제하기 위해 주요 기상요소를 독립변수로 하고 미세먼지를 종속변수로 하는 회귀식을 얻기 위해 주요 기상요소에 대해서도 미세먼지에 적용했던 것과 동일한 방법으로 KZ 필터링을 적용하였다. 이를 통해 기준변동과 단기변동으로 분리하여 다음과 같은 회귀식을 구하였다.

$$X_{bl} = \alpha_0 + \alpha_1 M_{bl} + \epsilon_{bl} \quad (4)$$

$$X_{st} = \beta_0 + \beta_1 M_{st} + \epsilon_{st} \quad (5)$$

여기서 X_{bl} 은 미세먼지의 기준변동성분, M_{bl} 은 특정 기상요소의 기준변동성분, ϵ_{bl} 은 기준변동성분의 잔차에 해당한다. X_{st} , M_{st} , ϵ_{st} 은 각각의 단기변동성분 요소들이고 α , β 는 회귀계수에 해당한다. 잔차들의 합은 다음 식과 같이 ϵ_t 로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_t &= \epsilon_{bl} + \epsilon_{st} \\ &= X_{bl} - \alpha_1 M_{bl} - \alpha_0 + X_{st} - \beta_1 M_{st} - \beta_0 \end{aligned} \quad (6)$$

이후 ϵ_t 에 KZ(365,3) 필터링을 적용하여 잔차의 장기변동성분을 구한다. 다음 미세먼지 장기변동성분의 평균을 더하면 특정 기상요소의 영향을 제거한 미세먼지농도의 장기변화를 추론할 수 있다.

연구결과 및 고찰

1. 시계열 분리

KZ 필터링을 통해 시계열을 분리하여 서울시 미세먼지의 장기추세를 추출하였다. 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 원시계열을 KZ(15,5) 필터링을 하여 얻은 기준변동을 원시계열에서 뺀 결과가 단기변동이다.

KZ(15,5) 필터링한 자료에서 KZ(365,3) 필터링을 하면 장기변동, 이후 기준변동에서 KZ(365,3)을 빼면 계절변동이 된다. 그림 2는 각 미세먼지 항목별 장기 추세선을 나타낸다.

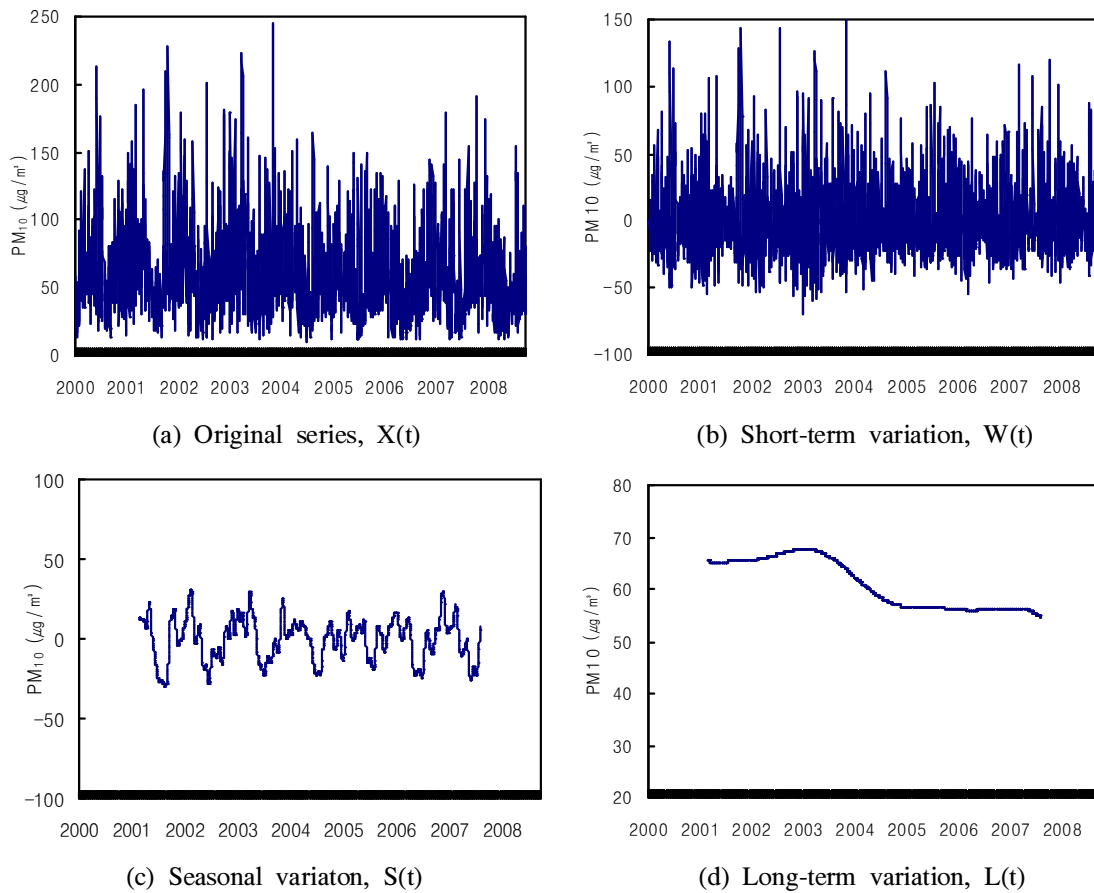


Fig. 1. Decomposition of PM_{10} time series by KZ filtering from Jan. 2000 to Dec. 2008.

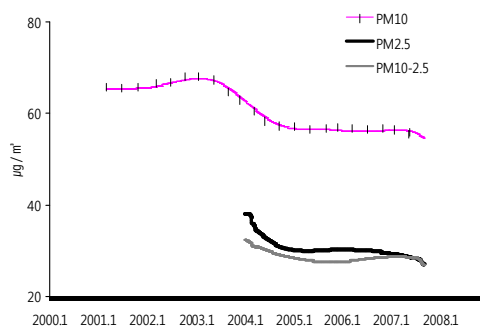


Fig. 2. Long-term trends of meteorologically-unadjusted PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{10-2.5}$.

PM_{10} 은 2003년을 기점으로 괄목할만한 감소추

세를 나타냈다. 이는 서울지역 미세먼지 농도 장기 추세를 2007년도까지의 자료로 분석하였던 이정영 등(8)의 분석과 일치하는 결과였다. 이러한 감소 추세는 2007년 초까지 유지되다가 중반에 약간의 증가추세를 보이다가 다시 감소추세를 나타냈다.

$PM_{2.5}$ 의 경우 상대적으로 짧은 자료 기간에도 불구하고 그 추세를 파악하는 데는 어려움이 없었다. PM_{10} 보다는 1년 정도 느린 2004년도부터 감소추세에 들어가다가 꾸준히 조금씩 감소하였다. 따라서 조대입자 부분인 $PM_{10-2.5}$ 의 추세를 분석해 본 결과 PM_{10} 과 유사한 추세를 나타냈다. 2007년도 초반에 증가추세가 보였으나 다시 중반 이후 감소하는 패턴을 보여주었다. 결국 $PM_{2.5}$ 는 2004년 이후 꾸준한 감소추세를 보였으며 PM_{10} 의 단

기적인 증가에는 조대입자부분의 증가가 영향을 주었음을 알 수 있다.

하층대기안정도, 풍속, 온도 등의 기상요소에도 동일하게 KZ 필터링 하여 장기추세를 추출하였다. 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 풍속은 약간 증가 추세, 하층대기안정도는 약간 감소 추세, 온도는 증감을 반복하면서 완만한 증가 추세를 보였다. 따라서 풍속 및 하층대기안정도는 미세먼지를 감소시키는 방향으로 작용했을 것으로 판단된다.

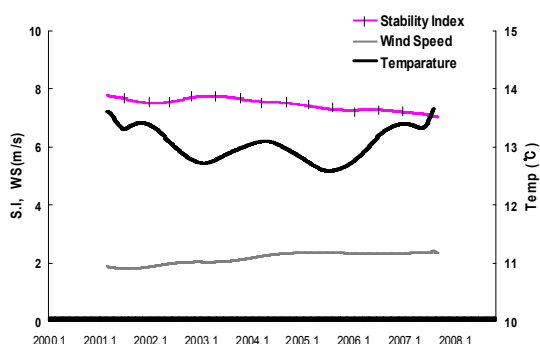


Fig. 3. Long-term trends of lower atmosphere stability index, wind speed and temperature.

2. 특정 기상요소와 상관관계

기상요소와 원시계열의 상관관계뿐만 아니라 분리한 시계열 주기별 상관관계도 의미가 있다(7). 주기별로 기상요소와 PM₁₀ 및 PM_{2.5}와의 상관관계

수는 표 1과 같다. 대체로 풍속 및 온도와는 음의 상관관계, 하층대기안정도와는 양의 상관관계를 보였다.

Wise and Comrie(7)의 경우와 같이 한 주기변동에서는 상관도가 높았던 요소가 다른 주기변동에서는 상관도가 낮게 나타났다.

PM₁₀의 경우 원시계열에서는 풍속과 하층대기안정도, 단기변동에서는 풍속과 하층대기안정도, 계절변동에서는 온도, 장기변동에서는 풍속이 상대적으로 높은 상관관계를 나타냈다.

PM_{2.5}의 경우 원시계열에서 풍속과 하층대기안정도, 장기변동에서는 풍속과 상대적으로 높은 상관관계를 나타냈다. 계절성을 대표한다고 할 수 있는 온도와는 상관관계는 PM₁₀보다 크지 않았다.

PM₁₀ 및 PM_{2.5}와 온도의 상관관계가 기준변동 및 계절변동에서 음의 상관관계를 나타낸 것은 실제로로 절대적인 온도와는 관계라기보다는 다른 요인에 의한 것일 수 있다. 즉, 여름철에는 주로 강우로 인해 미세먼지 농도가 낮고 겨울철에는 서풍계열 바람에 의한 중국대륙으로부터 오염물질 이동 및 지역적으로 난방 증가 등의 오염원 증가로 인해 미세먼지 농도가 높기 때문이다. 실제로 동일 계절 내에서 즉, 겨울철에는 온도와 미세먼지는 양의 상관관계를 나타냈다. 따라서 단일 기상요소와 미세먼지와의 상관관계보다는 다양한 차원에서 기상 상태를 분류하는 노력이 필요할 것이다.

Table 1. Correlation coefficient between meteorological variables and PM₁₀ and PM_{2.5} concentration

		Wind speed	Temperature	Stability index
PM ₁₀	Raw data	-0.226**	-0.092**	0.216**
	W(t)	-0.271**	0.103**	0.223**
	S(t)	0.107**	-0.421**	0.031
	L(t)	-0.193**	-0.016	0.048**
PM _{2.5}	Raw data	-0.297**	-0.021	0.215**
	W(t)	-0.021	-0.016	-0.005
	S(t)	0.043	-0.059**	-0.020
	L(t)	-0.148**	0.027	0.032

** Person's correlation at p<0.01.

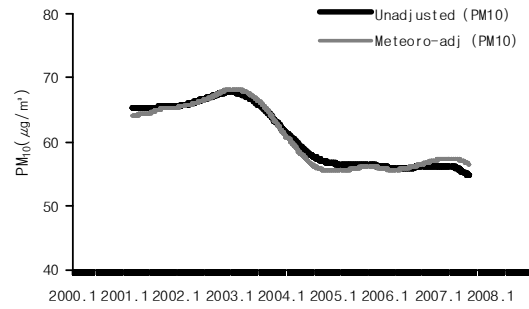
3. 기상요소를 배제한 장기추세 분석

미세먼지 농도에 대한 기상요소의 영향을 배제하기 위해 풍속, 온도, 하층대기안정도를 독립변수로 하고 미세먼지를 종속변수로 하는 중회귀식을 산출하였다. 미세먼지 뿐만 아니라 기상요소에 대해서도 기준변동과 단기변동으로 분리하였다(표 2 참조).

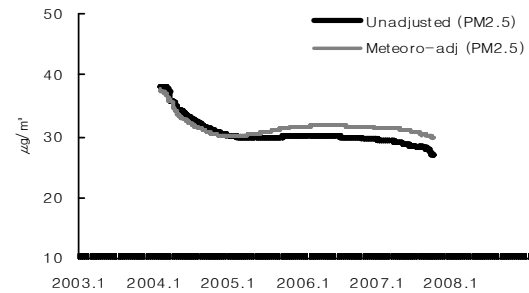
미세먼지와 기상요소와의 상관분석 결과에서 기준변동과 단기변동에서 상관관계가 높았던 기상요소가 각각 다르게 나타남에 따라 회귀분석의 오차가 커지는 단점이 있었다. 따라서 향후 연구에서의 개선을 위해 주기별로 상관성이 높은 기상요소를 다르게 채택할 필요가 있다. Wise and Comrie(7)는 오존의 경우는 단일 혹은 두 개 이상의 기상요소와 강한 상관성을 유지하는 데 비해 미세먼지의 경우 그렇지 않기 때문에 오차가 커지게 된다고 보고하였다. 서울지역 오존에 대해 동일한 방법을 적용한 김 등(6)의 연구에서는 보다 높은 R^2 값을 나타낸 바 있다.

이후 기준변동 및 단기변동의 중회귀식에서 산출된 잔차의 합에 KZ(365,3)을 적용하였다. 여기에 미세먼지 장기추세의 평균을 더하여 기상요소를 배제한 미세먼지농도의 장기추세를 추출하였다(그림 4 참조). KZ 필터링 특성상 시계열의 전 및 후반 자료가 삭제되므로 2008년도의 추세는 향후 1~2년 후 정확히 판정할 수 있을 것이다.

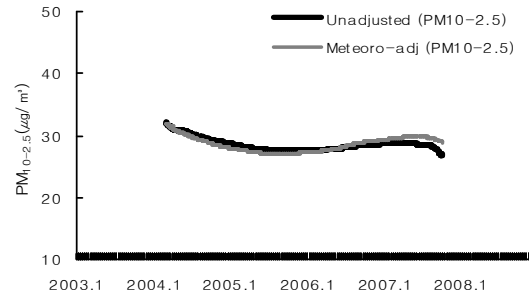
PM₁₀의 경우 2003년 전반적으로 특정 기상요소를 배제한 추세선과 적용하지 않은 추세선의 차이가 작았으며 이는 이 등(8)의 분석 결과와 일치한다. 미세먼지의 장기추세에 기상요소 보다는 다른 요인이 더 크게 작용했을 것으로 추정된다.



(a) PM₁₀



(b) PM_{2.5}



(c) PM_{10-2.5}

Fig. 4. Long-term trends of the meteorologically-adjusted and unadjusted particulate matter.

Table 2. Regression equations among PM₁₀ and PM_{2.5} concentration and meteorological variables ($X=\alpha_0+\alpha_1 \cdot SI+\alpha_2 \cdot WS+\alpha_3 \cdot Temp+\epsilon$)

X	PM ₁₀		PM _{2.5}	
	Baseline	Short term	Baseline	Short term
α_0	55.3512	-1.7531	16.6508	-1.1725
α_1	1.6436	0.1196	2.4565	0.0922
α_2	-0.5024	-0.5638	-1.3611	-0.3160
α_3	-0.4934	-0.6380	-0.2677	-0.2020
R^2	0.2925	0.2674	0.2205	0.1502

2004년도 후반기에는 특정 기상요소를 배제한 추세선이 적용하지 않은 추세선보다 낮으므로 특정 기상요소가 PM₁₀ 농도를 증가시키는 방향으로 작용했을 것이다. 반면에 2007년 전반기에는 특정 기상요소가 PM₁₀ 농도를 감소시키는 방향으로 작용했을 것이다.

PM_{2.5}의 경우 역시 PM₁₀처럼 특정 기상요소를 배제한 추세선과 적용하지 않은 추세선의 차이가 작았다. 따라서 미세먼지의 장기추세에 기상요소보다는 다른 요인이 더 크게 작용했을 것이다. 특정 기상요소를 배제한 추세선은 2004년 이후 뚜렷이 감소하다가 2005년 이후 약간 증가하다가 다시 조금씩 감소하는 경향을 보였다.

PM_{10-2.5}의 경우 2007년 전반기의 증가추세가 특정 기상요소를 배제한 추세선에서 더 뚜렷하였다. 이는 특정 기상요소가 PM_{10-2.5}의 증가 추세를 완화시킨 셈이다.

결국, 특정 기상요소를 배제했을 경우 PM₁₀의 농도는 2003년 이후 감소 추세에 있다가 2007년 전반기에 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 PM_{2.5} 보다는 PM_{10-2.5}의 증가에 의한 것이었다. PM_{2.5}는 2004년을 기점으로 뚜렷한 감소를 보였으며 이후 완만하게 감소 추세를 유지하고 있었다. 또한, 기상요소를 배제하지 않은 장기추세선과 배제한 추세선의 차이가 전반적으로 매우 적어 기상요소가 미세먼지의 장기추세에 미치는 영향보다는 다른 요소, 즉 배출량 증감 등의 영향이 큰 것으로 판단된다.

표 3은 환경부에서 2000년부터 2006년까지 서

울의 미세먼지 배출량을 산출한 것이다. 2004년부터 감소하기 시작하여 2006년 현저히 감소했음을 알 수 있다. 세부내역을 살펴보면 특히 이동오염원 배출량 부분의 감소가 상당한 기여를 하였다. 따라서 이러한 이동오염원과 관련된 배출량의 감소는 PM_{2.5} 농도의 꾸준한 감소에 기여하였을 가능성이 있다. 이 등(8)은 이러한 미세먼지 배출량의 감소가 서울지역 PM₁₀의 감소에 영향을 주었을 것으로 추론하였다. 그러나 김(12)은 최근 서울의 연평균 PM₁₀ 농도가 줄어들고 있으나 이 같은 변화가 기상요소에 의한 것인지, 배출량에 의한 것인지 아직 확실하지 않다고 보고하였다.

조대입자 부분의 완만한 증가로 볼 때 비산먼지 및 소각 제어 등과 같은 조대입자 부분에 대한 저감노력이 계속되어야 할 것으로 판단된다. 즉, 전체적인 먼지 농도를 줄이기 위해서는 다양한 분야에 대한 대책이 중요할 것으로 보인다.

결론

본 연구에서는 KZ 필터링 및 중회귀 분석을 적용, 서울지역 미세먼지의 시계열 분리 및 특정 기상요소 풍속, 온도 및 하층대기안정도를 배제한 장기추세분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 서울지역 미세먼지와 특정 기상요소는 시계열 주기별로 상관성이 다르게 나타났다. 향후

Table 3. Annual PM₁₀ emission amount in Seoul from 2000 to 2006(11)

Year	(Unit : ton/year)						
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Enenergy industry combustion	16	18	13	14	13	15	7
Non-industry combustion	445	427	341	313	324	367	363
Manufacturing industry combustion	7	9	5	5	3	3	4
Vehicle(road)	2,757	3,509	3,399	3,430	3,508	3,009	2,690
Vehicle(non-road)	521	566	875	916	570	913	349
Waste treatment	3	3	4	5	5	4	19
Sum	3,750	4,533	4,637	4,683	4,424	4,311	3,433

연구에서는 주기별로 상관성이 높은 기상요소를 다르게 채택하여 회귀분석의 오차를 재고할 필요가 있다.

둘째, 풍속 및 대기안정도의 장기추세는 미세먼지 농도를 감소시키는 방향으로 작용한 것으로 판단된다.

셋째, PM₁₀의 장기추세 분석 결과 특정기상요소를 배제하였을 때 2003년을 기점으로 감소 경향을 나타냈다. 2007년 전반기에 약간 상승하다가 다시 감소추세를 보였다. 이는 PM₁₀ 중 조대입자인 PM_{10-2.5}의 영향으로 인한 것이었음을 확인하였다.

넷째, PM₁₀ 중 초미세입자인 PM_{2.5}는 2004년을 기점으로 감소 경향이 뚜렷하였으며 이후 완만하지만 꾸준히 감소한 것으로 나타났다.

다섯째, 특정기상요소를 배제한 추세선과 배제하지 않은 추세선의 차이가 매우 적었다. 따라서 미세먼지 장기추세에 기상요소보다는 배출량 변화와 같은 원인이 더 크게 작용하였을 것으로 추론된다.

지리적 위치로 인해 특정 황사 기간 이외에도 인근 대륙으로부터 미세먼지 배경농도가 영향을 받을 수 있으며 기상요소의 영향을 제거하기 위해 본 연구에서 적용한 요소가 제한적이므로 장기추세 계산에 있어 불확실성이 충분히 존재한다. 그럼에도 본 연구는 기상의 영향을 고려한 미세먼지 농도의 장기적인 추세 연구로서 미세먼지 배출량 저감정책의 대기오염도 개선 효과를 추정하는데 기초 자료로 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- Laden F, Schwartz J, Speizer FE and Dockery DW : Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality: Extended Follow-Up of the Harvard Six Cities Study. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 173:667~672, 2006.
- 서울특별시 : 시정운영 4개년 계획 2006~2010(복지·환경·시민분야). p1062~1073, 2009.
- 김철희, 박일수, 이석조, 김정수, 홍유덕, 한진석, 진형아 : 하층대기의 연직 안정도 지료를 이용한 차량 2부제의 수도권 대기오염도 저감효과 분석. *한국대기환경학회지*, 29(2): 243~257, 2005.
- Rao ST, Zalewsky E and Zurbenko IG : Determinating temporal and spatial variations in ozone air quality. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 44:1089~1092, 1995.
- 허국영 : KZ 필터를 이용한 서울지역 지표면 오존농도의 장기적 분석. *서울대학교 환경대학원 도시계획석사학위논문*, 2001.
- 김유근, 오인보, 황유근 : 서울과 부산지역 기상의 영향을 제거한 오존농도 추세. *한국대기환경학회지*, 19(5):561~568, 2003.
- Wise EK and Comrie AC : Extending the Kolmogorov-Zurbenko filter : Application to ozone, particulate matter, and meteorological trends. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 55:1208~1216, 2005.
- 이정영, 공부주, 한진석, 이민도 : KZ 필터법을 이용한 서울지역 미세먼지 농도의 장기변화 분석. *한국대기환경학회지*, 24(1):63~71, 2008.
- 변희룡, 이동규, 정삼연 : 하층대기의 연직 안정도와 연관된 850 hPa 지오폠펠셜 고도장의 종관적 특성. *한국기상학회*, 31(3):213~228, 1995.
- Eskridge RE, Ku JY, Roa ST, Porter PS and Zurbenko IG : Separating different scales of motion in time series of meteorological variables. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(7):1473~1483, 1997.
- 환경부 : 대기오염배출량 2006. 2008.
- 김용표 : 서울의 미세먼지에 의한 대기오염. *한국대기환경학회지*, 22(5):535~553, 2006.