

ORIGINAL ARTICLE

KZ 필터를 이용한 부산지역 PM₁₀의 장기 추세 분석

도우곤 · 정우식^{1)*}

부산광역시 보건환경연구원, ¹⁾인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

Analysis of the Long-term Trend of PM₁₀ Using KZ Filter in Busan, Korea

Woo-gon Do, Woo-Sik Jung^{1)*}

Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan 46616, Korea

¹⁾Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

Abstract

To determine the effect of air pollution reduction policies, the long-term trend of air pollutants should be analyzed. Kolmogorov-Zurbenko (KZ) filter is a low-pass filter, produced through repeated iterations of a moving average to separate each variable into its temporal components. The moving average for a KZ(m, p) filter is calculated by a filter with window length m and p iterations. The output of the first pass subsequently becomes the input for the next pass. Adjusting the window length and the number of iterations makes it possible to control the filtering of different scales of motion. To break down the daily mean PM₁₀ into individual time components, we assume that the original time series comprises of a long-term trend, seasonal variation, and a short-term component. The short-term component is attributable to weather and short-term fluctuations in precursor emissions, while the seasonal component is a result of changes in the solar angle. The long-term trend results from changes in overall emissions, pollutant transport, climate, policy and/or economics. The long-term trend of the daily mean PM₁₀ decreased sharply from 59.6 ug/m³ in 2002 to 44.6 ug/m³ in 2015. This suggests that there was a long-term downward trend since 2005. The difference between the unadjusted and meteorologically adjusted long-term PM₁₀ is small. Therefore, we can conclude that PM₁₀ is unaffected by the meteorological variables (total insolation, daily mean temperature, daily mean relative humidity, daily mean wind speed, and daily mean local atmospheric pressure) in Busan.

Key words : PM₁₀, KZ filter, Long-term trend

1. 서론

도시대기측정망은 해당지역의 환경기준 달성여부

와 대기오염정책 시행효과 등의 파악을 주목적으로 하며(National Institute of Environmental Research, 2015a) 대기환경기준물질 6개 항목을 주요 모니터링

Received 1 December, 2016; Revised 15 January, 2017;

Accepted 17 January, 2017

*Corresponding author: Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

Phone : +82-55-320-3932

E-mail : wsjung1@inje.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대상으로 하고 있다. 그 중 PM_{10} 은 1995년부터 전국의 도시대기측정망에서 지금까지 측정되고 있으며 2015년부터는 $PM_{2.5}$ 가 환경기준 물질로 추가되면서 PM_{10} 과 더불어 측정이 되고 있다. 최근 들어 PM_{10} 은 도시지역 시정장애의 주요 원인이며 천식과 같은 호흡기 질환과 폐기능 저하 등의 원인으로 도시지역 대기오염도를 대표하는 물질로 인식이 되고 있다(Kim, 2009; Jung, 2013). 이에 따라 PM_{10} 저감을 위한 다양한 정책들이 시행되고 있으며(Seoul Development Institute, 2011) 최근에는 더 작은 입자인 $PM_{2.5}$ 로 관심이 확대되고 있는 추세이다. 도시대기측정망에서 장기적으로 측정되는 PM_{10} 의 농도변화를 통하여 대기오염정책의 시행효과나 대기질의 개선여부 등을 판단할 수 있다. 부산지역 PM_{10} 연평균 농도는 2004년 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2015년 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 들어 연간 환경기준을 만족하면서 전반적으로 감소하고 있는 추세이다(Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, 2015). 그러나 24시간 환경기준초과 횟수는 2001년 60회에서 2007년 397회로 크게 증가하였으며 2015년 145회로 최근까지 비교적 높은 수준을 보이고 있다(Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, 2015). 또한 '2013 국가 대기오염물질배출량'에 따르면 전국적인 PM_{10} 배출량은 2004년 62,491 ton에서 2013년 121,563 ton으로 전반적으로 증가하고 있으며 부산광역시는 특, 광역시 중 울산광역시 다음으로 높은 배출량을 보이고 있어 PM_{10} 에 대한 저감대책 마련이 시급한 것으로 보인다(National Institute of Environmental Research, 2015b). PM_{10} 의 발생원은 자연 배출원과 인위적인 배출원 등 다양한 경로를 통하여 생성된다. 또한 PM_{10} 은 높은 체류시간을 가지기 때문에 중위도 편서풍대에 위치한 우리나라의 경우 중국으로부터의 장거리 수송에 의한 영향을 많이 받고 있으며 해안과 내륙의 위치와 국지적 바람조건에 따라 농도 경향이 다르게 나타나기도 한다(Jeon, 2009). Yang et al.(2011)도 국내 배출원에 의한 PM_{10} 농도 증가도 뿐만 아니라 장거리 이동된 오염물질의 영향을 받는 경우도 있고 기상조건에 의해 고농도가 나타나는 것을 지적한 바 있다. 따라서 PM_{10} 의 원인규명과 저감대책 마련, 대기오염정책의 시행효과를 파악하기 위해서는 기상요소의

영향을 제거한 PM_{10} 의 장기추세 파악이 필수적인 요소라 할 수 있다. KZ (Kolmogorov-Zurbenco) 필터는 짧은 시간에 자주 발생하는 현상을 제거하는 저주파수 필터로 결측에 큰 영향을 받지 않으면서 원하는 시간과 크기의 변화 성분을 효과적으로 제거할 수 있어 대기오염물질의 장기추세 분석에 자주 사용되어져 왔다. Lu and Chang(2005)는 대만 타이페이 지역에서 기상 효과가 제거된 일 최고 오존농도의 장기추세 분석에 KZ 필터를 적용하였고, 그리스 중부지역, 인도 텔리지역에서 기상요소가 제거된 오존의 장기추세 분석에 KZ 필터가 적용되기도 하였다(Papanastasiou et al., 2012; Kumari et al., 2013). Wise and Comrie (2005a, 2005b)는 KZ 필터를 일평균 PM_{10} 의 장기추세분석으로 확장하여 미국 남서부 지역 주요도시에서 오존과 PM_{10} 의 장기추세 분석에 활용하기도 하였다. 국내에서는 Kim et al.(2003)이 서울과 부산의 오존 장기추세 분석에 KZ 필터를 적용하였고, Lee et al. (2008)은 KZ 필터를 이용하여 서울지역 미세먼지 농도의 장기추세분석을 수행하였다. 최근에는 Lee et al.(2015)이 전국의 12개 지역에서 일 최고 오존농도의 장기추세분석에 KZ 필터를 적용한 바 있다. 본 연구에서는 부산지역에 운영 중인 도시대기측정소의 2001년에서 2016년 9월까지 일평균 PM_{10} 을 대상으로 KZ 필터를 적용하여 장기변동을 분석하였다. 또한 PM_{10} 과 상관성이 높은 기상요를 파악하고 기상요소의 효과가 제거된 장기변동을 분석하였다. 이를 바탕으로 부산지역 PM_{10} 의 장기변동 특성을 파악하고 향후 효과적인 PM_{10} 저감정책 수립의 자료로 활용하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. PM_{10} 측정자료

부산지역의 도시대기측정소는 2001년 7개소에서 지속적으로 증가하여 2016년 9월말 현재 총 19개소가 운영 중에 있다. 용도지역별로는 공업지역, 상업지역, 녹지지역, 주거지역 등 비교적 고르게 분포되어 있다. Fig. 1은 부산지역 19개 대기오염측정소의 위치를 나타낸 그림이다. 19개 도시대기측정소의 시간별 PM_{10} 자료와 더불어 기상요소의 영향이 제거된 일평균

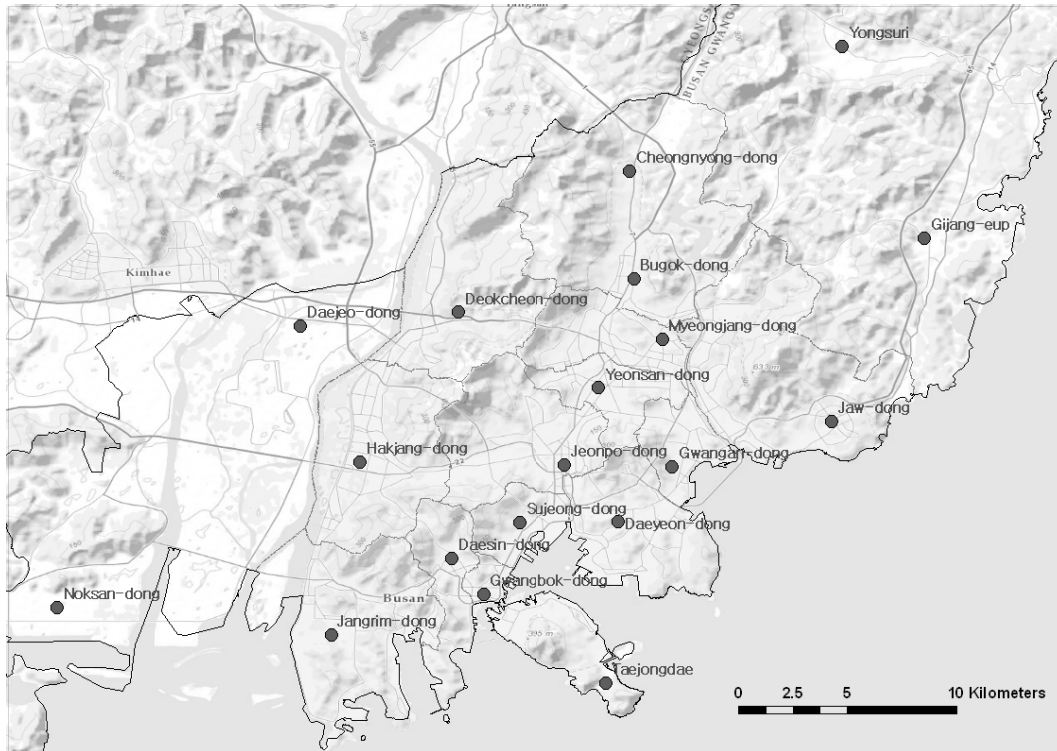


Fig. 1. The locations of air quality monitoring stations in Busan.

PM₁₀의 장기 추세를 분석하기 위하여 부산지방기상청에서 관측되고 있는 기상요소들을 이용하였다. 도시대기측정소 19개소와 비교하여 기상요소는 1개 지점에서만 관측이 되고 있으며 도시대기측정소 간의 차이점보다는 부산지역전체의 장기적인 PM₁₀의 변화 추세를 밝히는 것이 본 연구의 주 목적이므로 하루 중 18개 이상의 유효자료가 있는 측정소만을 대상으로 각 측정소에서 측정된 시간자료를 평균하여 2001년에서 2016년 9월까지의 부산지역 전체의 일평균 PM₁₀ 농도를 계산하였다. 단기간 큰 영향을 제외하기 위하여 기상청의 황사 관측일을 기준으로 황사발생 전, 후일과 당일은 분석에서 제외 하였다. 분석기간 중에 신설되는 측정소는 자료가 공개되는 시점부터 분석에 포함하였다.

2.2. KZ 필터법

KZ 필터법은 결측이 발생할 수밖에 없는 대기오염

측정자료에 대하여 원하는 성분을 분리해낼 수 있는 방법으로(Eskridge et al., 1997) 대기오염 측정자료를 사용하여 장기간의 변화를 살펴보는 데 효과적인 방법이다. 본 연구에서는 앞에서 산정된 2001년부터 2016년 9월까지 부산지역의 일평균 PM₁₀ 시계열자료를 성분 분리하기 위하여 KZ 필터를 적용하였다. KZ 필터법을 적용하기 위하여 먼저 원시 시계열자료(A(t))는 식(1)과 같이 장기변동 성분과 계절변동 성분, 단기변동 성분의 합으로 구성된다고 가정하였다(Rao and Zurbenko, 1994).

$$A(t)=L(t)+S(t)+W(t) \quad (1)$$

여기서 A(t)는 원시 시계열, L(t)는 장기변동, S(t)는 계절변동, W(t)는 단기변동 성분을 나타낸다. Wise and Comrie(2005)는 장기변동 성분은 장기적인 배출량의 변화, 오염물질의 주기적인 수송현상, 기후변화

또는 대기오염저감 정책의 변화에 기인하고 계절변동 성분은 태양고도의 변화, 단기변동은 매일 매일의 날씨 변화나 지구물질 배출량의 단기변화에 기인한다고 하였다. 식(1)에서 정의된 각 성분을 분리해내기 위하여 KZ(m, p) 필터를 적용하였다. KZ(m, P) 필터는 복합적인 주기로 구성된 원시 시계열 자료를 m 일간의 이동평균을 p 회 반복하여 단주기의 변동을 분리해 내는 low-pass 필터이며 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$Y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=k}^k A_{i+j} \quad (2)$$

여기서 $m=2k+1$ 이며, Y_i 는 다음 이동평균의 입력 자료로 다시 이용된다. KZ(m, p) 필터를 통하여 제거하고자 하는 단기변동 성분에 따라 m과 p의 값은 조절이 가능하다(Rao et al., 1995). 원시 시계열의 각 성분은 Wise and Comrie(2005)의 방법을 사용하여 계산할 수 있는데, 먼저 KZ(15, 5) 필터를 적용하여 원시 시계열 자료에서 단기변동을 제거한, 장기변동 성분과 계절변동 성분의 합을 계산할 수가 있으며 이를 식(3)과 같이 기준변동 성분으로 정의하였다.

$$\text{Baseline}(t) = \text{KZ}(15, 5) = L(t) + S(t) \quad (3)$$

한편 장기변동 성분은 KZ(365, 3) 필터를 적용하여 구할 수 있는데 결국 기준변동 성분과의 조합을 통하여 각 성분을 분리해 낼 수 있게 된다. 다음으로 일평균 PM_{10} 에 영향을 미치는 주요 기상요소들에도 똑같은 과정으로 각 성분을 분리한 다음 기상요소들의 영향을 제거하기 위하여 기상요소들의 각 성분을 독립 변수로 하고 일평균 PM_{10} 의 각 성분을 종속 변수로 하는 중회귀식을 구하였다.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_{BL}(t) + \varepsilon_{ST}(t) \\ &= [A_{BL}(t) - a \cdot M_{BL}(t)] + [A_{ST}(t) - b \cdot M_{ST}(t)] + c \quad (4) \end{aligned}$$

여기에서 $\varepsilon_{BL}(t)$ 는 기준변동 성분의 회귀식과 일평균 PM_{10} 의 차이를 나타내며, $\varepsilon_{ST}(t)$ 는 단기변동 성분의 회귀식과 일평균 PM_{10} 의 차이를 나타낸다. 다시 말하

면 $A_{BL}(t)$ 는 일평균 PM_{10} 의 기준변동 성분이고 $M_{BL}(t)$ 은 기상요소의 기준변동 성분을 의미하며 마찬가지로 $A_{ST}(t)$ 와 $M_{ST}(t)$ 는 일평균 PM_{10} 과 기상요소의 단기변동 성분이며, 상수 a, b, c는 중회귀식의 회귀계수이다. 최종적으로 $\varepsilon(t)$ 값에 KZ(365, 3) 필터를 적용하여 잔차의 장기변동 성분을 구한 후 앞에서 구한 일평균 PM_{10} 의 장기변동 성분의 평균을 더하여 기상요소의 영향이 제거된 일평균 PM_{10} 의 장기변동 성분을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 일평균 PM_{10} 의 성분 분해

Fig. 3은 2001년부터 2016년 9월까지 부산지역 일평균 PM_{10} 의 시계열 자료에 KZ 필터를 적용하여 각 성분을 분리한 것을 나타낸다. (a)는 KZ 필터를 적용하기 전의 원시 시계열 자료의 분포를 보여주고 있다. 매일 매일의 일평균 PM_{10} 은 다양한 요소들의 영향으로 변화하고 있으며 전반적으로 최근으로 갈수록 감소하는 추세를 확인할 수 있다. (b)는 원시 시계열 자료에 KZ(365, 3) 필터를 적용하여 산출된 일평균 PM_{10} 의 장기변동 성분을 나타낸다. 원시 시계열 자료보다 기간이 짧은 것은 이동평균의 적용 따라 시계열의 양 끝단 자료가 절사되기 때문이다. 따라서 최근까지의 장기변동 성분을 파악하기 위해서는 더 많은 기간이 포함되어야 하겠지만 과거의 경향성을 가지고 판단해도 무리는 없을 것으로 판단된다. 부산지역의 일평균 PM_{10} 의 장기 추세는 2002년 중반 $59.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2015년 초반 $44.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전반적으로 감소 추세에 있다. 2005년부터 2012년까지는 감소하다가 2013년 소폭증가한 후 2014년부터 최근까지 감소하였다. 장기변동 성분에 기인하는 장기적인 배출량의 변화, 기후변화 또는 대기오염저감 정책의 영향으로 판단이 되나 향후에 이들 간의 관계를 밝히는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. (c)는 원시 시계열 자료의 기준변동 성분과 장기변동 성분의 차로서 구해지는 계절변동 성분의 변화를 나타낸다. 계절의 변화에 따라 봄과 겨울에 농도가 증가하고 여름철에 감소하는 패턴이 반복되고 있음을 알 수 있다. (d)는 원시 시계열에서 기준변동 성분을 뺀 단기변동 성분을 나타낸다.

Table 1. Relative contributions of each component to the total variance of daily mean PM₁₀

	Long-term variation, L(t)	Seasonal variation, S(t)	Short-term variation, W(t)
Relative contributions(%)	7.2	14.2	71.0

단기변동 성분은 매일 매일의 날씨변화나 전구물질 배출량의 단기변화에 기인하므로 변화의 주기가 짧고 급격하게 변화하는 모습을 보이고 있다. (c)와 (d)에서 음수는 각각 기준변동 성분 값이 장기변동 성분 값보다 낮은 경우와 원시 시계열이 기준변동 성분보다 낮은 경우를 의미한다.

Table 1은 원시 시계열 자료의 분산에 대한 각 성분별 분산의 기여도를 나타낸다. 세 성분의 공분산이 고려되지 않았기 때문에 세 성분의 합이 정확하게 100%가 되지는 않지만 각 원시 시계열 자료에 대한 각 성분의 대략적인 기여도를 알 수 있다. 일평균 PM₁₀은 대략적으로 단기변동 성분의 기여도가 71%로 나타나

가장 높은 영향력을 보였고 다음으로 계절변화에 의한 기여도가 14.2%, 장기변동 성분에 의한 기여도가 7.2% 나타났다. 따라서 매일 매일의 PM₁₀의 변화는 계절변동과 단기변동에 의해서 가장 많은 영향을 받는 것을 알 수 있으며 장기변동을 분석하기 위해서는 이들 성분의 제거가 필수임을 알 수 있다.

3.2. 일평균 PM₁₀과 기상 요소와의 관계

기상의 영향이 제거된 일평균 PM₁₀의 장기 추세를 분석하기 위하여 먼저 부산지방기상청에서 관측되고 있는 기상요소들 중에 PM₁₀과 관련이 높은 요소들에 대하여 식(1)의 각 성분을 분리하였다. PM₁₀과 상관

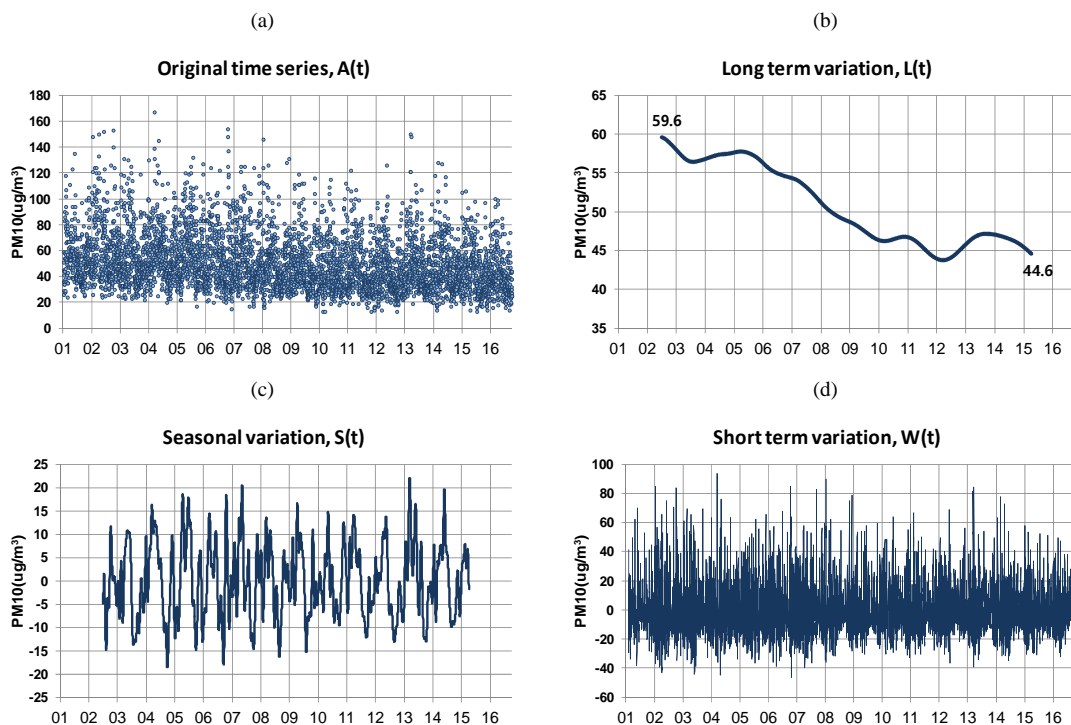


Fig. 2. Decomposition of the daily mean PM₁₀ concentration by KZ filter. (a) original time series, (b) long-term component, (c) seasonal component, (d) short-term component.

Table 2. Correlation coefficients between daily mean PM₁₀ and the meteorological elements according to the each component

	DEW	SR	TMP	RH	WS	PRE
PM ₁₀	-0.038**	0.179**	0.005	-0.119**	-0.171**	0.017
L(t)	0.002	-0.411**	-0.616**	0.229**	-0.193**	-0.538**
S(t)	-0.227**	0.310**	-0.228**	-0.204**	0.023	0.040**
W(t)	0.184**	0.166**	0.446**	-0.072**	-0.211**	-0.008

**Significant at 0.01 level

DEW : dew point temperature, SR : total insolation, TMP : daily mean temperature, RH : daily mean relative humidity, WS : daily mean wind speed, PRE : daily mean local atmospheric pressure

높은 기상요소들로 Lee et al.(2008)은 상대습도, 기온, 지상풍속, 혼합고, 하층대기안정도를 고려하였고 Wise and Comrie(2005a)는 일 최고기온, 일평균 풍속, 일평균 이슬점온도, 혼합고, 일평균 상대습도, 일사량 합계와 강수량을 고려하였다. 본 연구에서는 추가적인 산출과정을 거치지 않고 기상청에서 직접적으로 관측이 되어 바로 이용할 수 있는 요소들 중 PM₁₀과 관련성이 높은 이슬점온도(DEW), 일사량 합계(SR), 일평균 기온(TMP), 일평균 상대습도(RH) 일평균 풍속(WS), 일평균 현지기압(PRE)을 대상으로 PM₁₀과의 상관성을 분석하였다.

Table 2는 앞에서 언급된 기상요소들 각 성분과 일평균 PM₁₀의 각 성분들 간의 상관계수를 나타내고 있다. 원시 시계열자료의 경우 뚜렷한 상관성이 보이지 않고 있으나 분리된 각 성분별 상관계수는 원시 시계열 자료와 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분은 일평균 기온의 장기변동 성분과 -0.616으로 높은 상관성을 보이고 있으며 일평균 현지기압과 -0.538, 일사량 합계와 -0.411로 비교적 높은 상관성을 보이고 있다. 즉 일사량과 기온, 기압의 장기추세는 감소하고 반면에 PM₁₀의 장기 추세는 증가하는 것을 알 수 있으며 계절변동 성분은 일사량 합계와, 단기변동 성분은 일평균 기온과 약한 상관성을 보여 주고 있다.

Fig. 3은 각 기상요소와 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분을 함께 나타낸 그림이다. Table 2에서 본 것처럼 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분은 일평균 기온과 일평균 현지기압, 일사량 합계의 장기변동 성분과 상관성이 있으며 음의 상관성을 보이고 있다. 일평균 기온의 장기변동 추세는(Fig. 3(c)) 2007년에 크게 증가하였다

가 약하게 감소한 후 최근까지 증가하는 경향을 보이고 있어 2005년 이후 감소추세인 일평균 PM₁₀과는 반대의 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 일사량 합계의(Fig. 3(b)) 경우도 2004년 이후 전반적으로 증가 추세에 있으며 일평균 현지기압은(Fig. 3(f)) 2009년 이후 증가하는 경향을 보이고 있어 감소 추세인 일평균 PM₁₀과 음의 상관성을 보이고 있다. 이를 통하여 이러한 기상요소들의 장기변동 추세가 일평균 PM₁₀ 장기변동 성분의 감소에 어느 정도 관련이 있음을 판단할 수 있으며 향후 이들 간의 관계를 명확하게 밝히는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

3.3. 기상의 영향이 제거된 일평균 PM₁₀의 장기변동 추세

기상의 영향이 제거된 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분을 분석하기 위하여 먼저 앞에서 제시한 기상요소들의 성분 분해된 자료와 일평균 PM₁₀의 성분 분해된 자료를 이용하여 기준변동 성분과 단기변동 성분 간의 회귀식을 구하였다. Table 3은 기준변동 성분과 단기변동 성분의 일평균 PM₁₀과 기상요소들 간의 회귀 분석 결과를 나타낸다. 기상요소의 경우 stepwise법을 적용하여 단계적으로 회귀 모델에 입력하도록 하였으며 결과적으로 기준변동성분에서는 일평균 기온, 일사량 합계, 일평균 현지기압, 일평균 풍속이 단기변동 성분에서는 일평균 기온, 일평균 상대습도, 일평균 풍속이 회귀식에서 사용되었다. 각 회귀식의 R 제곱 값은 각각 0.257, 0.248로 다소 낮게 나타나 향후 설명력이 높은 기상요소들 추가할 필요성이 있어 보인다.

Table 4는 각 성분별 산정된 회귀식의 상세정보를 나타내고 있다. 기준변동 성분의 경우 일평균 기온,

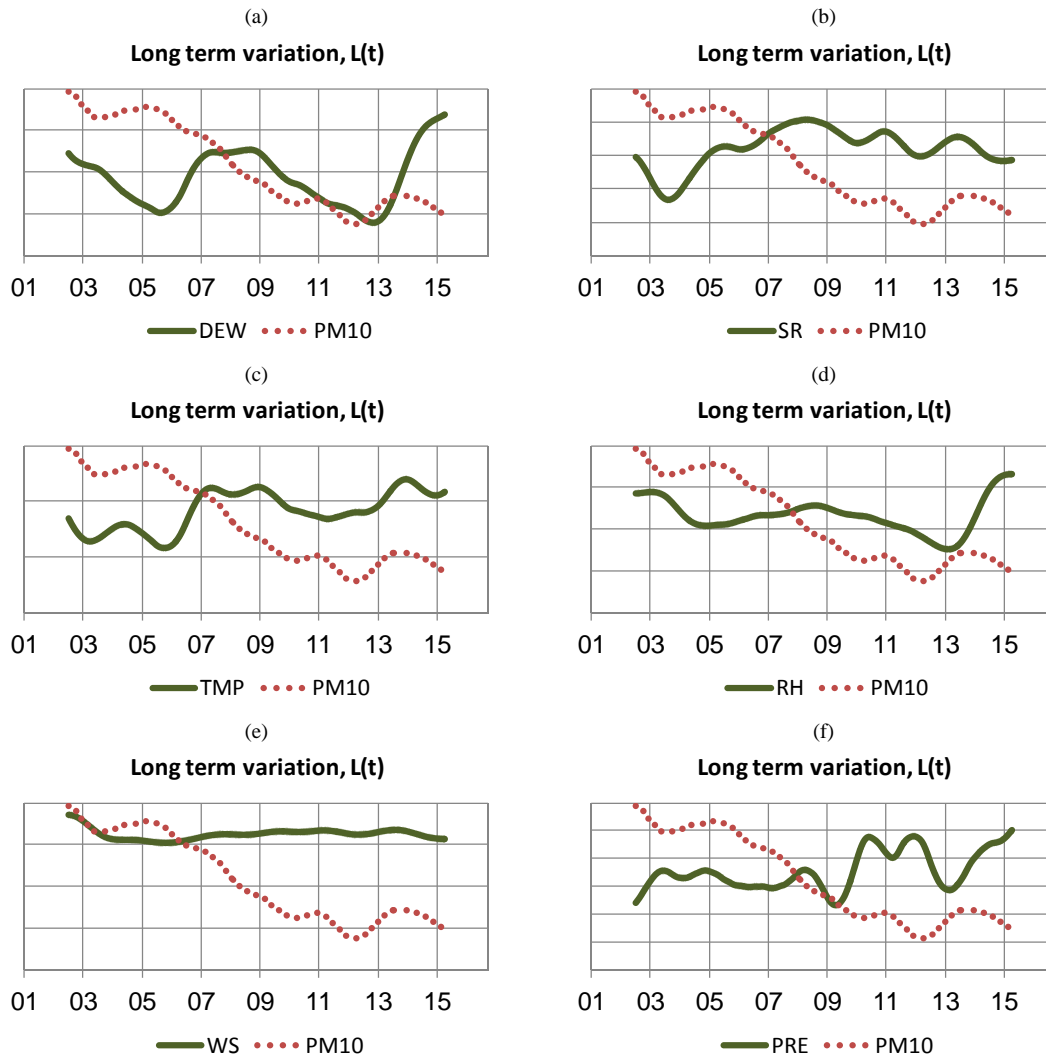


Fig. 3. Comparison of long term trend between daily mean PM₁₀ and meteorological elements, daily mean PM₁₀ concentration by KZ filter. (a) dew point temperature, (b) total insolation, (c) daily mean temperature, (d) daily mean relative humidity, (e) daily mean wind speed and (f) daily mean local atmospheric pressure.

Table 3. Models suggested through the step-wise regression process and R-Sq for each component

	Meteorological variables	R ²	Adjusted R ²
Baseline	TMP, SR, PRE, WS	0.257	0.256
Short term	TMP, RH, WS	0.248	0.248

SR : total insolation, TMP : daily mean temperature, RH : daily mean relative humidity, WS : daily mean wind speed, PRE : daily mean local atmospheric pressure

Table 4. Coefficients of multi-regression models in each component

		Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t*
		B	Standard error	Beta	
Baseline	Constant	575.508	50.771		11.335
	TMP	-1.019	0.032	-0.771	-32.276
	SR	1.348	0.047	0.478	28.831
	PRE	-0.519	0.05	-0.276	-10.472
	WS	-1.799	0.293	-0.075	-6.132
Short term	Constant	0.043	0.207		0.206
	TMP	3.934	0.096	0.501	41.02
	RH	-0.321	0.018	-0.223	-18.29
	WS	-2.562	0.187	-0.159	-13.722

*Significant at 0.01 level

SR : total insolation, TMP : daily mean temperature, RH : daily mean relative humidity, WS : daily mean wind speed, PRE : daily mean local atmospheric pressure

일사량 합계, 일평균 현지기압, 일평균 풍속이 설명변수로 사용되었고 일사량 합계만 정(+)의 영향을 미치고 나머지 항목들은 모두 음(-)의 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 설명변수들 중 일평균 기온이 가장 높은 영향을 미치고($\beta = -0.771$) 있으며 다음으로 일사량 합계가($\beta = 0.478$) 비교적 높은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 단기변동 성분에서는 일평균 기온과 일평

균 상대습도가, 일평균 풍속이 설명변수로 사용되었으며 기준변동 성분과 달리 일평균 기온이 정(+)의 영향을 미치고 나머지 항목들은 모두 음(-)의 영향을 미치고 있으며 설명변수들 중 일평균 기온이 가장 높은 영향을 미치고 있다($\beta = 0.501$).

Fig. 4는 기준변동 성분과 단기변동 성분에서 산정된 기상요소와의 회귀식을 적용하여 각 성분에서 기상

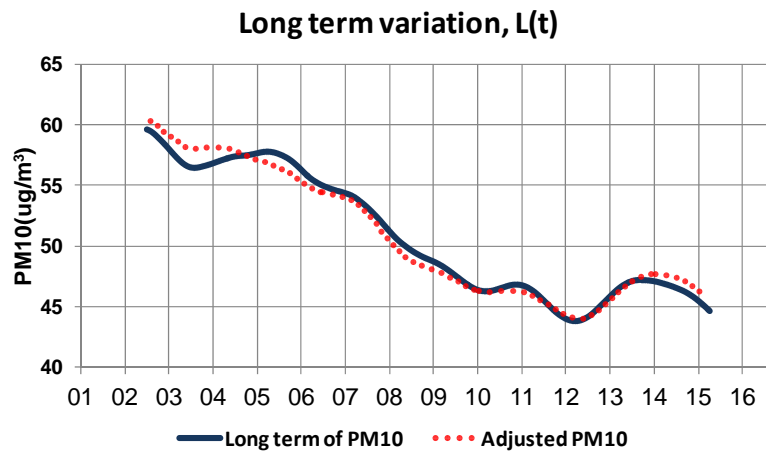


Fig. 4. The adjusted and unadjusted trends of daily mean PM₁₀. The solid line, unadjusted data that has been smoothed to show long-term trends through time; the dotted line, estimated daily mean PM₁₀ with the influence of the daily mean temperature, the total insolation, the daily mean local atmospheric pressure and the daily mean wind speed in baseline components and the daily mean temperature, the daily mean relative humidity and the daily mean wind speed in short term component removed.

요소의 영향이 제거된 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분을 나타낸다. 2004년 중반까지는 기상요소의 영향이 제거된 PM₁₀이 다소 높게 나타나고 있으며 이후 2006년 말까지 반대의 경향을 보이고 있다. 2014년까지는 두 경우가 크게 차이를 보이지 않고 비슷한 농도 변화를 하고 2014년부터 다시 기상요소의 영향이 제거된 장기변동 성분이 높아지고 있다. 기상요소의 영향이 제거된 장기변동 성분이 높다는 것은 고려된 기상요소에 의해서 실제 PM₁₀의 장기변동 성분이 낮아진 것을 의미한다. 따라서 2004년 중반까지와 2014년 이후는 기상요소의 영향으로 일평균 PM₁₀이 다소 낮아졌다고 판단할 수 있다. 그러나 전체 분석기간에 걸쳐 전반적으로 기상요소의 영향이 적은 것으로 나타나고 있는데 이는 앞에서 고려된 기상요소들이 PM₁₀과 큰 상관성을 보이지 않아서 산정한 회귀식의 설명력이 비교적 낮기 때문에 판단된다. 향후에 PM₁₀ 농도에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 혼합고, 대기안정도 등 추가적인 산정과정을 거치는 기상요소들을 추가해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 결론적으로 기상요소의 영향이 제거된 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분은 기상의 영향이 제거되지 않은 PM₁₀의 장기변동 성분과 유사하게 2012년까지 낮아지고 있으며 2013년 일시적으로 증가한 후 다시 낮아지는 패턴을 보이고 있다. 또한 고려된 기상요소들은 일평균 PM₁₀의 장기변동에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단이 된다.

4. 결론

부산지역 일평균 PM₁₀의 장기추세 분석을 위하여 본 연구에서는 부산지역에서 운영 중인 도시대기측정소의 2001년에서 2016년 9월까지 시간별 PM₁₀ 자료를 바탕으로 일평균 PM₁₀을 산정하고 KZ필터를 적용하여 원시 시계열 자료를 성분 분해하였다. 일평균 PM₁₀의 장기 추세는 2002년 중반 59.6 ug/m³에서 2015년 초반 44.6 ug/m³으로 전반적으로 감소 추세에 있으며 2005년부터 2012년까지는 감소하다가 2013년 소폭증가한 후 2014년부터 최근까지 감소하는 추세를 보이고 있다. 계절변동 성분은 계절의 변화에 따라 봄과 겨울에 농도가 증가하고 여름철에 감소는 패턴이 반복되고 있으며 단기변동 매일 매일의 날씨변

화나 전구물질 배출량의 단기변화에 의하여 변화의 주기가 짧고 급격하게 변화는 모습을 보이고 있다. 부산지방기상청에서 관측하고 있는 기상요소들 중 이슬점온도, 일사량 합계, 일평균 기온, 일평균 상대습도, 일평균 풍속, 일평균 현지기압의 원시 시계열 자료를 성분 분해한 후 일평균 PM₁₀과의 상관분석을 실시한 결과 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분은 일평균 기온의 장기변동 성분과 -0.616으로 높은 상관성을 보이고 있으며 계절변동 성분의 경우 일사량 합계와, 단기변동 성분은 일평균 기온과 약한 상관성을 보여 주고 있다. 기상요소들의 성분 분해된 자료와 일평균 PM₁₀의 성분 분해된 자료를 이용하여 기준변동 성분과 단기변동 성분 간의 회귀분석을 실시한 결과 일평균 기온, 일사량 합계, 일평균 현지기압, 일평균 풍속, 일평균 상대습도가 설명변수로 사용되는 회귀식을 도출할 수 있었다. 기준변동 성분과 단기변동 성분에서 산정된 기상요소와의 회귀식을 적용하여 기상요소의 영향이 제거된 일평균 PM₁₀의 장기변동 성분을 계산한 결과 기상의 영향이 제거되지 않은 PM₁₀의 장기변동 성분과 유사하게 2012년까지 낮아지고 있으며 2013년 일시적으로 증가한 후 다시 낮아지는 패턴을 보이고 있고 고려된 기상요소들은 일평균 PM₁₀의 장기변동에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단이 된다.

REFERENCES

- Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, 2015, <http://heis.busan.go.kr/>
- Eskridge, R. E., Ku, J. Y., Roa, S. T., Porter, P. S., Zurbenko, I. G., 1997, Separating different scales of motion in time series of meteorological variables, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 78(7), 1473-1483.
- Jeon, B. I., 2009, Characteristics of PM₁₀ concentration at seashore and inland according to land-use in Busan, *J. of Wetlands Research*, 11(2), 47-54.
- Jung, A. R., 2013, Effect of PM₁₀ on mortality : Systematic review and meta-analysis, Graduate School of Public Health, M.S Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Kim, K. W., 2009, Physico-chemical characteristics of visibility impairment in a national park area, *J. of Korean Society for Atmospheric Environ.*, 25(4),

- 325-338.
- Kim, Y. K., Oh, I. B., Hwang, M. K., 2003, Meteorologically adjusted ozone trends in the Seoul and Busan metropolitan areas, *J. of Korean Society for Atmospheric Environ.*, 19(5), 561-568.
- Kumari, S., Jayaraman, G., Ghosh, C., 2013, Analysis of long-term ozone trend over Delhi and its meteorological adjustment, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 10, 1325-1336.
- Lee, J. Y., Kong, B. J., Han, J. S., Lee, M. D., 2008, Long term analysis of PM₁₀ concentration in Seoul using KZ filter, *J. of Korean Society for Atmospheric Environ.*, 24(1), 63-71.
- Lee, C. B., Kim, J. C., Cheon, T. H., Lee, S. H., 2015, Long-term trend in ozone pollution adjusted for meteorological effects in urban, *Korean J. of Nature Conservation*, 9(1), 32-39.
- Lu, H. C., Chang, T. S., 2005, Meteorologically adjusted trends of daily maximum ozone concentrations in Taipei, Taiwan, *Atmospheric Environ.*, 39, 6491-6501.
- National Institute of Environmental Research, 2015a, Annual report of air quality 2015.
- National Institute of Environmental Research, 2015b, National air pollutants emission.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D., Bartzanas, T., Kittas, C., 2012, Estimation of ozone trend in central Greece, based on meteorologically adjusted time series, *Environ. Model Assess.*, 17, 353-361.
- Rao, T. S., Zalewsky, E., Zurbenko, I. G., 1995, Determining temporal and spatial variations in ozone air quality, *J. of the Air & Waste Manage. Assoc.*, 45, 57-61.
- Rao, T. S., Zurbenko, I. G., 1994, Detecting and tracking changes in ozone air quality, *J. of the Air & Waste Manage. Assoc.*, 44, 1089-1092.
- Seoul Development Institute, 2011, A Study on building customized management strategies based on local PM₁₀ emission inventory in Seoul.
- Wise, E. K., Comrie, A. C., 2005a, Extending the Kolmogorov - Zurbenko filter : Application to ozone, particulate matter, and meteorological trends, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 55, 1208-1216.
- Wise, E. K., Comrie, A. C., 2005b, Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States, *Atmospheric Environ.*, 39, 2969-2980.
- Yang, G. H., Lee, J. J., Lyu, Y. S., Chang, L. S., Lim, J. H., Lee, D. W., Kim, S. K., Kim, C. H., 2016, Analysis of the recent trend of national background PM₁₀ concentrations over Korea, China, and Japan, *J. of Korean Society for Atmospheric Environ.*, 32(4), 360-371.