



논문

우리나라 미세먼지 농도 추이와 고농도 발생 현황

Trends of the PM₁₀ Concentrations and High PM₁₀ Concentration Cases in Korea

여민주, 김용표^{1)*}

이화여자대학교 환경공학과, ¹⁾이화여자대학교 화학신소재공학과

Min Ju Yeo, Yong Pyo Kim^{1)*}

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

¹⁾Department of Chemical Engineering & Materials Science, Ewha Womans University

접수일 2019년 2월 28일

수정일 2019년 4월 8일

채택일 2019년 4월 16일

Received 28 February 2019

Revised 8 April 2019

Accepted 16 April 2019

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-3277-2832

E-mail : yong@ewha.ac.kr

Abstract The public's concern on ambient PM₁₀ has increased sharply since 2013. To check whether the concern is related the PM₁₀ concentration, the trends of (1) the annual mean PM₁₀ concentration, (2) the frequency by the PM₁₀ concentration interval, and (3) the high concentration occurrence duration time are studied. It is found that all three indicators have decreased between 2001 and 2017. For example, the annual mean PM₁₀ concentration decreased from 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2001 to 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2017 in Seoul. Generally, the frequency of the PM₁₀ concentration over 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ has decreased while that less than 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ has changed little. Thus, the frequency between 20 and 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ has increased. However, different trends in the PM₁₀ concentration, frequency by concentration level and frequency over 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for duration are observed among the administrative districts. To reduce the annual average concentration of PM₁₀, there should be more measures to reduce the frequency of PM₁₀ concentration between 20 and 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ as well as over 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for increasing the frequency of low PM₁₀ below 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Key words: PM₁₀ concentration, Frequency by PM₁₀ concentration interval, High concentration occurrence duration, Regional difference

1. 서론

미세먼지에 대한 국민들의 관심은 2013년부터 급증(그림 1)하여 미세먼지는 환경문제를 넘어 사회문제로 인식되는 상황이다(Song, 2018). 그림 1은 2004년부터 2019년까지 '미세먼지'로 검색한 결과를 가장 빈도가 높은 시점을 100으로 나타내고, 나머지 기간의 검색 빈도를 상대적인 수치로 나타낸 것(Google, 2019)이다.

2013년부터 미세먼지 문제가 부각되기 시작한 이유는 여러 가지로 제시되고 있다. 2013년에 PM_{2.5}를 대기환경기준물질로 지정하여 기준을 설정하고 미세

먼지 예보제를 실시할 예정이라고 정부에서 발표하였고(MOE, 2013), 2013년 이후 언론에서 미세먼지를 보도한 건수가 증가한 것 또한 국민들의 관심과 불안을 증가시킨 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2016). 이와 함께 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 미세먼지를 1군(Group 1) 발암물질로 분류하여(IARC, 2013) 국민들의 미세먼지에 대한 관심 증가에 영향을 끼쳤을 수 있다.

이러한 여러 요인들로 인해, 국민들은 미세먼지 문제가 갈수록 더 심해진다고 생각하여(YNA, 2019) 미세먼지 농도가 이전에 비해 높아졌고, 고농도 발생빈

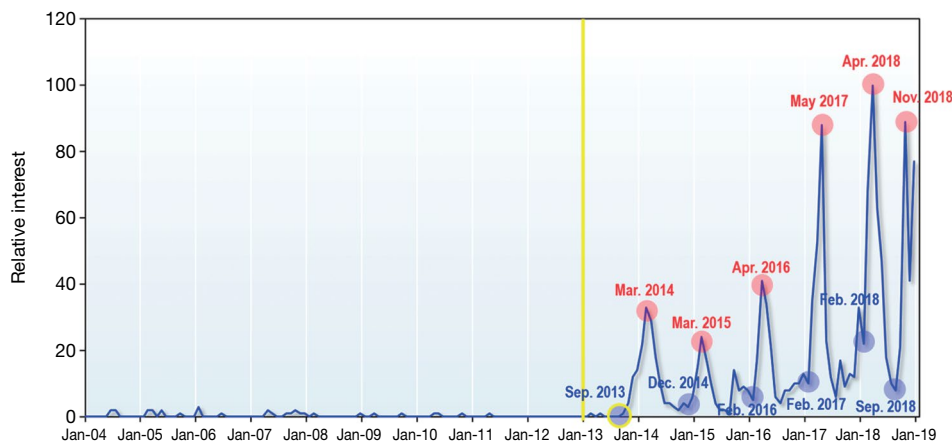


Fig. 1. Relative number of internet search as a proxy of public interest for PM_{10} in Korea (maximum value = 100) (raw data: Google, 2019).

도가 증가하였다고 느낀다. 이와 함께 언론의 영향까지 더해져 ‘고농도 미세먼지는 중국발’이라는 관념까지 자리 잡고 있어(NRE, 2018) 국민 불안이 매우 높은 상황이다.

정부도 미세먼지를 사회적 재난으로 인정하고 있으며, 범정부차원으로 2013년 이후 꾸준히 미세먼지 저감을 위한 정책, 예를 들어, 미세먼지관리종합대책 등을 수립 및 추진하고 있다(KIST, 2018). 지금까지 정부의 미세먼지 대책들은 연평균 미세먼지 농도를 줄이기 위한 정책에 집중되어 있었다. 2019년 2월 15일부터는 ‘미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(이하 특별법)’이 시행되었고, 특별법에서는 고농도 미세먼지 발생에 대한 비상저감 조치에서 민간부문의 의무참여 근거를 마련하였으므로 앞으로 미세먼지 고농도 사례 저감 효과가 기대되는 상황이다.

하지만, 국민들의 불안을 해소하기 위해서는 미세먼지 체감농도가 높아진 현상적인 이유를 파악하는 것이 필요하다. 사회적인 이슈가 되어 언론에서 많이 접하면서 미세먼지 문제를 심각하게 받아들이게 된 것인지, 실제로 미세먼지 문제가 현상적으로, 예를 들어 농도가 증가했거나 고농도 발생빈도가 증가했거나 등, 심화되어 국민 불안이 증대된 것인지를 판단할 필요가 있다.

최근 우리나라에서는 미세먼지 고농도 현상을 이해하고 원인을 파악하여 문제를 해결하기 위한 연구가 증가하고 있는데, 지역 단위의 단기적인 고농도 사례 발생에 대한 유형분석(Ban *et al.*, 2018; Shin *et al.*, 2018; SI, 2018; CNI, 2017; Lee *et al.*, 2014)이 주를 이룬다. 이러한 연구는 미세먼지 고농도 발생 원인을 파악하고 문제를 해결하기 위해 필요하지만, 국가 단위로 문제 해결 방향을 설정하기 위한 전국 단위의 종합적인 현황 파악이 필요하다.

전국을 권역별로 구분하여 PM_{10} 장기 추이를 살펴본 연구(Kim *et al.*, 2018)도 있지만, 권역 또는 지역별 차이에 대한 종합적인 분석과 농도 수준에 따른 분석이 주된 내용이 아니라는 한계가 있다. 또한, 현재 국민들의 불안 해소에 기여하기 위해서는 지금 우리나라 미세먼지 문제 상황을 장기적인 추이와 지역별 차이 파악 등을 통해 객관적으로 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 국민들이 체감하는 것처럼 미세먼지 농도와 고농도 발생 빈도, 고농도 발생 연속일수가 증가하였는지를 파악하기 위하여 전국의 2001년부터 2017년까지의 PM_{10} 시계열 자료를 이용하여 우리나라 지역별 (1) 미세먼지 농도와 (2) 고농도 사례 발생 빈도, (3) 고농도 사례 발생 연속일수 추이를 비교하여 살펴보았다.

2. 자료와 방법

본 연구에서는 도시대기측정망 자료를 활용하여 PM_{10} 농도와 고농도 사례 발생 빈도 및 연속일수를 산정하였다. 도시대기측정망은 도시지역의 평균대기질 농도를 파악하여 환경기준 달성여부를 판정하기 위해 운영하고 있으며 (MOE and NIER, 2018), 이 밖에도 우리나라에는 교외대기, 국가배경농도, 도로변대기, 유해대기물질, 대기중금속, 광화학대기오염물질, 산성강하물, 지구대기, 초미세먼지 성분, 대기오염집중 측정망과 같이 총 11개 종류의 측정망이 전국 111개 시·군구에 구축되어 있다. 2017년 12월말 기준으로 우리나라 전체 대기오염측정망은 총 533개소가 있으며, 이중 도시대기측정망은 전국 96개 시·군의 282개소에서 환경기준성 물질들을 측정하고 있다 (NIER, 2018).

본 연구에서는 이 중 2012년까지 설치된 252개 측정소의 자료를 분석에 활용하였는데, 이는 미세먼지에 대한 국민의 관심이 2013년부터 급증한 이유가 2013년 전과 후의 미세먼지 농도, 고농도 사례 발생 빈도 및 연속일수 차이에서 기인한 것인지, 예를 들어, 2013년 이후 미세먼지 고농도 사례가 증가했는지 등을 동일한 측정소 자료를 이용하여 파악하기 위해서다.

본 연구에서는 지역별 결과를 우리나라 17개 시·도 가운데 세종시를 제외한 16개 시·도 지역 ((a) 서울, (b) 인천, (c) 경기, (d) 부산, (e) 대구, (f) 광주, (g) 대전, (h) 울산, (i) 강원, (j) 충북, (k) 충남, (l) 전북, (m) 전남, (n) 경북, (o) 경남, (p) 제주)에 대해 살펴보았다. 세종시는 2015년 이후 자료만 제공되기 때문에 제외하였고, 우리나라 미세먼지 정보제와 비상저감조치도 시·도 단위로 실시하고 있다 (NIER, 2018).

본 연구에서는 측정소별 시간별 미세먼지 농도 측정값 (KECO, 2019)을 이용하여 전국의 지역별 미세먼지 연평균 농도, 연간 미세먼지 농도 구간별 발생 빈도수를 이용한 빈도분율, 고농도 발생 연속일수를 계산하였다. 장비점검, 통신장애 등 이상 자료가 발생한 경우 음수 (예를 들어, -999)로 표시가 되는데 (KECO, 2019) 이 값을 제외한 유효 자료만 사용하였다.

2.1 미세먼지(PM_{10}) 연평균 농도 계산 방법

본 연구에서는 기존 연구들 (NIER, 2018; Ghim and Kim, 2013)과 동일하게 자료의 통계처리 시 대상기간 중 75% 이상의 측정 자료가 확보된 경우, 즉 측정소별로 일일 24시간에 대해 75% 이상 자료 (18시간 이상)가 확보된 경우 2001년부터 2017년까지 일평균을 산정하였고, 이 값을 이용하여 지역별 일평균 및 연평균을 산정하였다.

2.2 미세먼지 농도 구간별 빈도분율 계산 방법

연간 PM_{10} 농도 구간별 빈도분율은 2001년부터 2017년까지 연간 전국의 지역별 PM_{10} 농도 구간별 발생 빈도수를 이용하여 계산하였다. 지역별 PM_{10} 농도 값은 지역 내 모든 측정소 유효 자료의 시간당 PM_{10} 농도 값을 활용하여 구하였다.

PM_{10} 농도 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 부터 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지는 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 구간마다 해당 값을 넘는 경우의 빈도수 계산하였다. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 구간으로는 120, 150, 200, 250, $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 설정하여 각각의 값을 넘는 경우의 빈도수를 계산하였다. 미세먼지 농도 구간별 빈도비율은 전체 지역별 시간당 유효 자료 갯수에 대한 농도 구간별 해당 빈도수로 구하였다. 시간당 값을 활용하였으므로 측정소별 연간 최대 유효자료 개수 (또는 최대 빈도수)는 365일 기준으로 8,760개이다. 빈도분율은 빈도비율 값에 100을 곱하여 나타내었다.

2.3 미세먼지 고농도 발생 연속일수별 빈도수 산정방법

PM_{10} 고농도 발생 연속일수별 빈도수는 2001년부터 2017년까지 전국의 지역별 일평균 PM_{10} 농도 값을 이용하여 계산하였다. 지역별 일평균 PM_{10} 농도 값은 2.1절과 동일한 방법으로 구하였고, 일평균 PM_{10} 농도가 3일부터 10일간 고농도로 지속된 빈도수를 계산하였다.

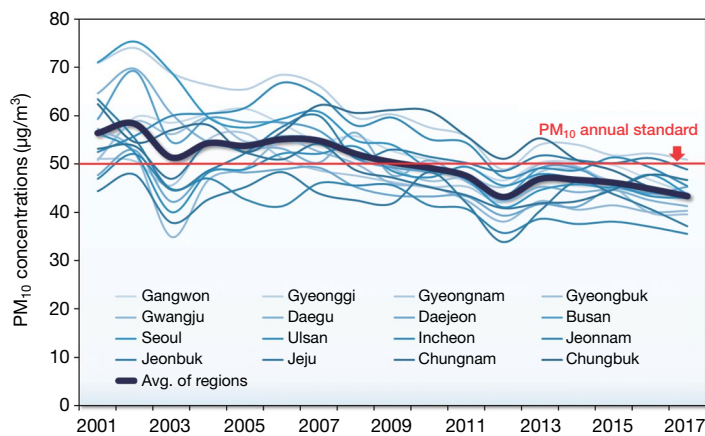
미세먼지 고농도 기준에 대해서는 다양한 관점이 있는데, 사람들은 주로 미세먼지 농도가 '나쁨' 이상일 때 또는 미세먼지 주의보 또는 경보가 발령되거나 비

Table 1. Criteria for high PM₁₀ levels.

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	WHO level	National ambient air quality standards		'Unhealthy' level	'Very unhealthy' level	Advisory level**	Warning level**
		Before	Current*				
PM ₁₀	20/year 50/day	70/year 150/day	50/year 100/day	80/hour	150/hour	150/hour	300/hour
PM _{2.5}	10/year 25/day	25/year 50/day	15/year 35/day	35/hour	75/hour	75/hour	150/hour

*PM₁₀: Since 2007, PM_{2.5}: Since 2018

**Issued when the PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations are over the criteria more than 2 hours, respectively.

**Fig. 2.** Trends of annual mean PM₁₀ concentrations in Korea by region between 2001 and 2017 (raw data: KECO, 2019).

상저감 조치가 시행될 경우 고농도 상황이라 인식을 한다. 고농도 미세먼지 관련 연구에서는 일평균(24시간 평균) 대기환경기준을 초과하는 경우를 주로 고농도 상황으로 판단한다(SI, 2018; CNI, 2017). 대기환경기준, ‘나쁨’과 ‘매우 나쁨’ 기준, 미세먼지 주의보 및 경보 기준을 표 1에 제시하였다. WHO 기준을 초과하는 경우를 고농도로 판단하는 경우도 있으므로 이 기준에 대해서도 표 1에 제시하였다.

최근 정부는 특별법에서 PM_{2.5}에 대해서 비상저감조치 시행 기준을 마련하였다. 비상저감조치는 PM_{2.5}의 주의보와 경보 농도 수준을 주로 고려하였으며, ① 당일(비상저감조치 시행일 전날) PM_{2.5}의 평균농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고, 다음날(비상저감조치 시행일)의 24시간 평균농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 것으로 예측되는 경우, ② 당일 초미세먼지 주의보(75 $\mu\text{g}/$

m^3 이상 2시간 지속)·경보(150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속)가 발령되고, 다음날의 24시간 평균농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 것으로 예측되는 경우, ③ 다음날의 초미세먼지 평균농도가 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (매우 나쁨)를 초과할 것으로 예측되는 경우 시행된다.

본 연구에서는 우리나라 일평균 PM₁₀ 대기환경기준인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 연속일수별 빈도수를 산정하기 위한 고농도 기준으로 설정하였고, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도가 3일부터 10일간 지속된 빈도수를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세먼지 연평균 농도 추이

그림 2에서 볼 수 있듯이 우리나라 대부분의 지역

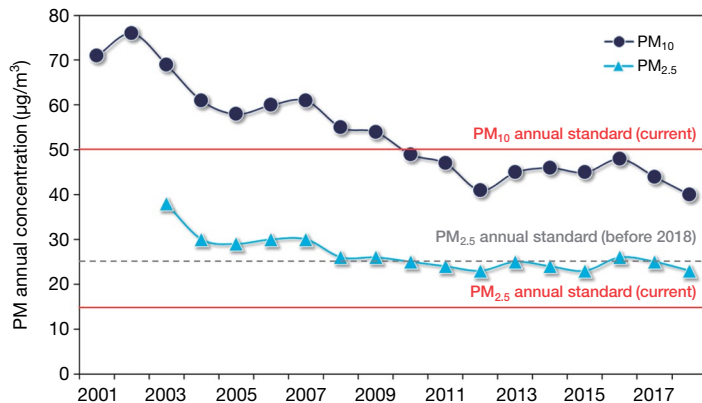


Fig. 3. Trends of annual mean PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Seoul between 2001 (2003 for PM_{2.5}) and 2017 (data for 2018 is before confirmation) (raw data for PM₁₀: KECO, 2019; for PM_{2.5}: SMG, 2019).

에서 PM₁₀ 연평균 농도는 2001년 이후 전반적으로 감소하였다. 많은 지역에서 2003년 PM₁₀ 연평균 농도가 급감하였고, 2012년에 대부분의 지역에서 최저값을 나타내었다. 이후 2013년에 다소 증가하였지만, 2017년까지 전국 대부분의 지역에서 PM₁₀ 연평균 농도는 연간 대기환경기준인 50 µg/m³ 이하(그림 2)로 2010년 이전에 비해서는 낮은 농도를 나타내었고, 2001년부터 2017년까지 전반적으로 감소하는 추이를 나타내었다. 지역별 PM₁₀ 연평균 농도 추이와 특성에 대해서는 주로 3.2절에서 농도 구간별 빈도분율과 함께 논의하였다.

도시대기 측정소에서 PM_{2.5}의 시간당 농도는 2015년부터 공식적으로 측정하기 시작하였는데(KECO, 2019), 서울시의 경우 그 이전부터 발표된 자료가 있어 그림 3에서 서울시의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 연평균 농도를 나타내었다. 서울시의 PM₁₀과 PM_{2.5} 연평균 농도 모두 다른 지역들의 PM₁₀ 연평균 농도와 마찬가지로 2000년대 이후 계속해서 감소하였고, 2012년에 최저 수준을 나타내었다. 이후 다소 증가하였지만 2016년 이후 다시 감소하였다(그림 3).

2010년 이후 서울시의 PM₁₀ 농도는 연평균 대기환경기준인 50 µg/m³ 이하였다. 서울시의 PM_{2.5}는 2003년부터 2018년까지 전기간 현재 연평균 대기환경기준인 15 µg/m³를 초과하였다. 하지만 2008년 이후 서울시

PM_{2.5} 농도는 2018년 3월까지의 연평균 대기환경기준이었던 25 µg/m³에 근접한 수준에서 증감을 반복하는 추이를 나타내었다. 2000년대 중반 이후 서울의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 모두 2000년대 초반에 비해서 낮은 수준을 나타내어 2001년(PM_{2.5}는 2003년)부터 2017년까지 전반적으로 감소했다고 볼 수 있다.

이를 통해, 2001년부터 2017년까지 우리나라 대부분의 지역에서의 PM₁₀ 연평균 농도와 서울시의 PM_{2.5} 연평균 농도는 국민 체감도와는 달리 감소하였다는 것을 확인할 수 있었다. 단, 그림 2와 5의 지역별 PM₁₀ 연평균 농도를 보면 2013년 이후 일부 지역은 그 감소추이가 뚜렷하지 않다.

지역별 PM₁₀ 일평균 농도를 이용하여 2001년부터 2017년까지와 2013년부터 2017년까지의 선형회귀식의 기울기를 비교하여 보면(표 2), 대부분 음수이기는 하지만(감소하고 있음) 서울을 비롯하여 경기, 대구, 광주, 대전, 강원, 충남 지역의 농도 추이 기울기가 2001년부터 2017년에 비해 2013년부터 2017년까지가 더 작은 절대값을 나타내고, 대전과 충남은 2001년부터 2017년에 음수였다가 2013년부터 2017년 양의 값을 나타내어 감소율이 줄어들었다는 것을 확인할 수 있었다.

2001년부터 2017년까지 지역별 PM₁₀ 연평균 농도는 감소하였지만 앞에서 언급하였던 WHO 산하

IARC에서의 미세먼지 1군 발암물질 지정, 정부의 PM_{2.5} 기준 설정 및 미세먼지 예보제 시행에 대한 발표, 언론에서의 미세먼지 보도 건수 증가와 함께 미세먼지

Table 2. Slopes of linear regression lines of daily mean PM₁₀ concentration by region and period. Cases with A) Slope between 2001 and 2017 is smaller than B) Slope between 2013 and 2017 are shaded. (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$)

	A) Slope between 2001 and 2017	B) Slope between 2013 and 2017
(a) Seoul	-5.1×10^{-3}	-1.3×10^{-3}
(b) Incheon	-2.6×10^{-3}	-4.1×10^{-3}
(c) Gyeonggi	-4.2×10^{-3}	-4.0×10^{-3}
(d) Busan	-3.4×10^{-3}	-4.0×10^{-3}
(e) Daegu	-4.0×10^{-3}	-3.1×10^{-3}
(f) Gwangju	-2.1×10^{-3}	-9.0×10^{-4}
(g) Daejeon	-1.0×10^{-3}	2.2×10^{-3}
(h) Ulsan	-1.3×10^{-3}	-3.7×10^{-3}
(i) Gangwon	-2.6×10^{-2}	-6.4×10^{-3}
(j) Chungbuk	-2.3×10^{-3}	-8.0×10^{-3}
(k) Chungnam	-1.8×10^{-3}	1.8×10^{-3}
(l) Jeonbuk	-1.1×10^{-3}	-3.2×10^{-3}
(m) Jeonnam	-2.2×10^{-3}	-2.2×10^{-3}
(n) Gyeongbuk	-2.7×10^{-3}	-6.4×10^{-3}
(o) Gyeongnam	-1.3×10^{-3}	-3.9×10^{-3}
(p) Jeju	-9.0×10^{-4}	-4.1×10^{-3}

먼지 연평균 농도가 최저를 기록한 2012년 직후 2013년 대부분의 지역에서 미세먼지 연평균 농도가 증가한 것이 국민들의 관심과 불안을 증가시켜 미세먼지 체감 농도를 높이는 데 영향을 주었을 가능성이 있다.

2000년대 이후 미세먼지 농도가 전반적으로 줄어들었음에도 불구하고 국민들이 미세먼지 문제에 민감해지고 불안해하는 것은 국민들의 대기질 관리에 대한 요구 수준과 삶의 질에 대한 기대치가 이전에 비해 높아졌기 때문이라는 의견도 있고 이 또한 국민불안을 높인 요인으로 고려할 수 있다. 여전히 선진국에 비해서는 농도가 높은 상황(NAEK *et al.*, 2017)인 것 역시 국민들의 불안 요소의 하나로 볼 수 있다. 하지만, 이것으로 2013년이라는 특정 시점에 국민 관심이 급증한 이유를 설명하기는 어렵다.

3.2 PM₁₀ 농도 구간별 빈도분율 추이

미세먼지 연평균 농도가 줄었어도 고농도 사례 발생 빈도는 증가하여 국민 불안에 기여했을 수 있다. 표 1에서 고농도로 제시한 기준에 대한 서울에서의 연간 PM₁₀ 시간당 발생 빈도분율을 그림 4에, 지역별 농도 구간별 연간 PM₁₀ 빈도분율과 PM₁₀ 연평균 농도를 그림 5 (20, 50, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 경우를 선명하게 나타냄)에 제시하였다. 그림 4와 5를 보면 농도 구간

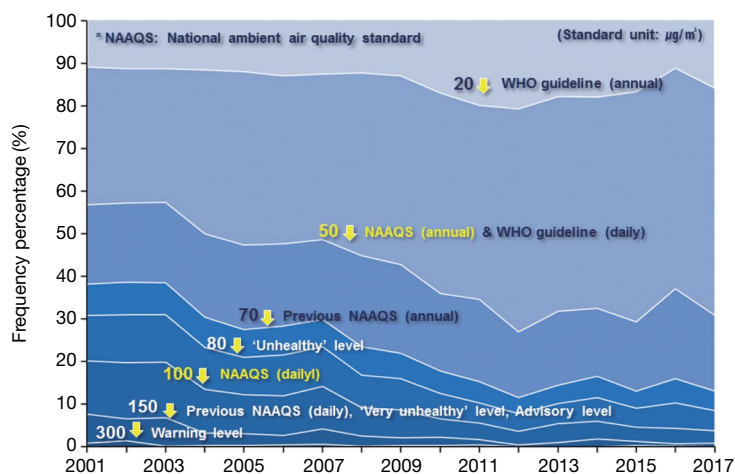


Fig. 4. Annual PM₁₀ frequency percentage by the concentration level in Seoul between 2001 and 2017 (raw data: KECO, 2019).

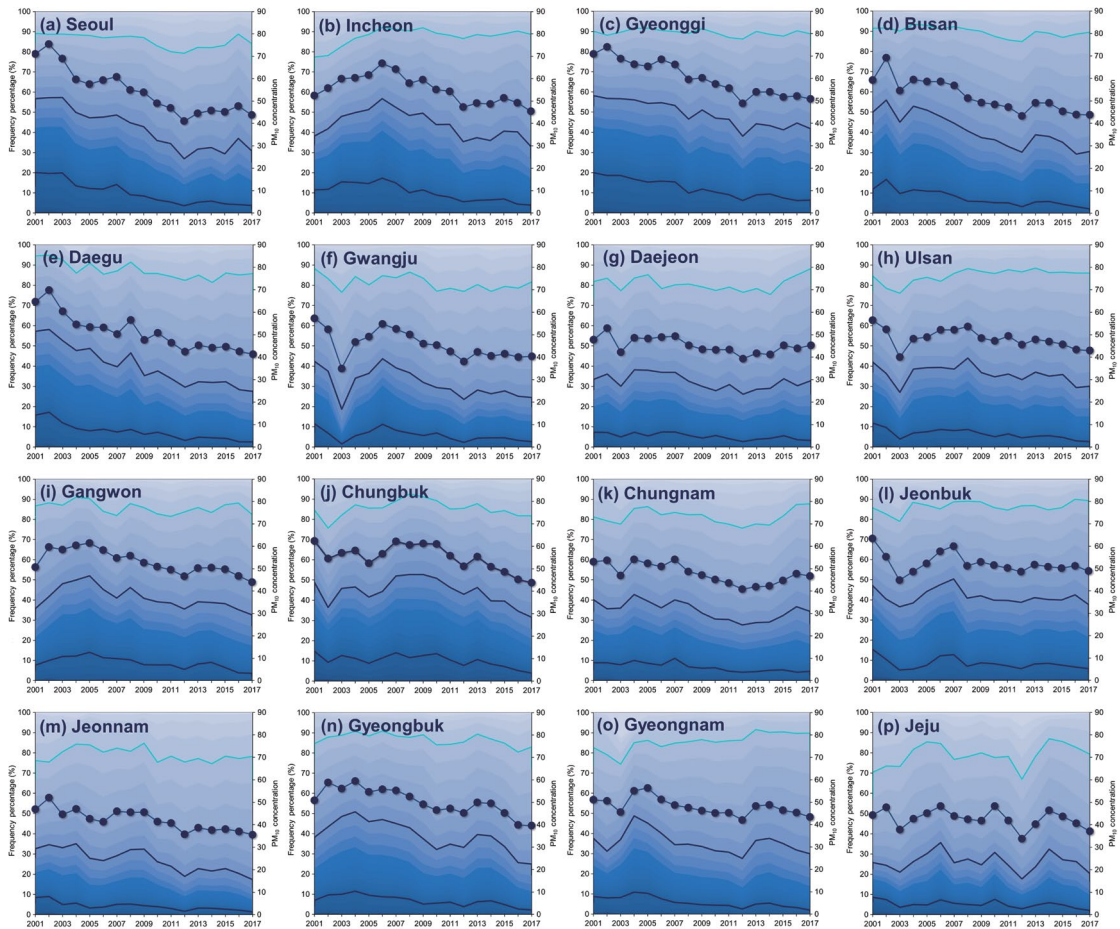


Fig. 5. Annual PM_{10} frequency percentage by the concentration level (bold lines for $>20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (first light line), $>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (third dark line), $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (fourth dark line)) and annual mean PM_{10} concentration (second dark line with circle markers) by region in Korea between 2001 and 2017 (y-axis (left): Frequency percentage/y-axis (right): PM_{10} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)) (raw data: KECO, 2019).

별 빈도분율이 서울을 포함한 대부분 지역에서 PM_{10} 연평균 농도와 유사하게 2012년에 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

서울의 경우 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 PM_{10} 빈도분율과 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이의 빈도분율은 증가한 반면, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 넘는 빈도분율이 감소한 것을 확인할 수 있다. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 넘는 경우도 2001년부터 2017년까지 전반적으로 감소추이를 나타내어 고농도 발생 빈도 또한 감소하였다고 판단할 수 있다. 이를 통해, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 넘는 고농도 빈도분율이 줄어든 것이 서울의

PM_{10} 연평균 농도 감소에 기여했다는 것을 확인할 수 있다.

하지만 지역에 따라 PM_{10} 농도 구간별 발생 빈도 추이는 다를 수 있다. 부산, 대구, 광주, 강원, 전남, 경북 등의 지역은 서울과 유사하게 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 PM_{10} 빈도분율이 2001년부터 2017년까지 증가하였지만, 다른 지역은 증가추세가 뚜렷하지 않다(그림 5). 인천, 울산, 전북, 경남 등의 지역은 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 PM_{10} 빈도분율이 오히려 감소하였다. 또한 인천, 경기, 부산, 대구, 충남, 전남, 경남 등의 지역은 서울과

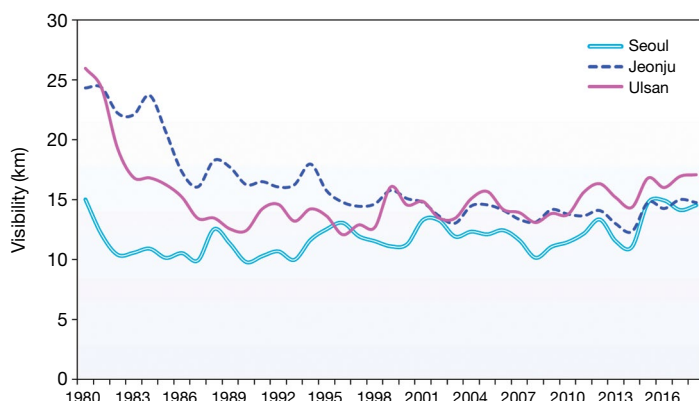


Fig. 6. Trends of annual mean visibility in Seoul, Jeonju, and Ulsan between 1980 and 2018 (raw data: KMA, 2019).

유사하게 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이의 빈도분율이 증가하였지만, 다른 지역은 증가추세가 뚜렷하지 않다 (그림 5). 하지만 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이의 빈도분율이 감소한 지역은 없는 것으로 판단되고 모든 지역에서 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 넘는 빈도분율은 2001년부터 2017년까지 전반적으로 감소하였다.

일부 지역에서 WHO에서 제시하는 PM_{10} 연평균 기준인 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에 해당하는 빈도분율이 개선되지 않았으므로, 앞으로 PM_{10} 농도를 개선하고 PM_{10} 에 의한 건강영향을 줄이기 위해서는 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이의 빈도를 줄여 연평균 농도가 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 빈도를 늘리기 위한 방안이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 2001년부터 2017년까지 전반적으로 고농도 발생 빈도가 감소하였더라도 미세먼지 고농도 사례는 국민 체감도에 크게 영향을 줄 수 있으므로, 계속해서 줄이기 위한 대책이 필요하다.

한편, 그림 5를 보면 PM_{10} 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도분율 추이는 PM_{10} 연평균 농도 추이와 매우 흡사하다. 대부분의 지역에서 2002년 미세먼지 농도와 농도 구간별 빈도분율이 최고값을 보였는데, 인천과 경남은 2000년대 중반 최고값을 보였다. 서울과 경기도는 2002년 미세먼지 농도가 높았다가 감소하였지만 인천은 2006년 미세먼지 농도가 높아진 것에 대해서는 보다 상세한 분석이 필요하다.

대부분의 지역에서 2012년 미세먼지 농도가 최저

수준이었는데, 주로 우리나라 남쪽 지역에 해당하는 영남, 호남, 충남(대전 포함), 제주 지역은 2003년에도 미세먼지 농도가 급감하였고, 특히 울산, 광주, 전북은 2003년에 최저 수준을 나타내었다. 이러한 2002년, 2003년의 지역별 농도 특성에 대해서도 상세 분석이 필요하다.

수도권 풍하지역에 해당하는 강원과 충북의 경우 전반적인 추이가 서울과 인천, 경기도의 양상이 혼재되어 있는 것으로 판단된다. 서울과 경기도는 2000년대 초반, 인천은 2000년대 중반에 농도가 최고를 나타내었는데, 강원과 충북은 2000년대 초중반 뚜렷한 증감 추이를 나타내지 않았다.

우리나라의 대표적인 공업도시의 하나로 국지적인 배출원이 많은 것으로 예상되는 울산은 2008년 이후 PM_{10} 농도와 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 빈도분율이 다소 감소하였는데, 이와는 대조적으로 대형 점오염원이 거의 없는 전북의 경우 2000년대 중반 이후 농도가 전반적으로 거의 변하지 않았다.

이를 통해 지역별 PM_{10} 농도와 고농도 발생 빈도 추이에는 차이가 있으며, 지역별 미세먼지 농도에 영향을 주는 요인이 다를 것이라는 점을 예상할 수 있다. 예를 들어, 지역별로 1차 배출과 2차 생성에 의한 기여율이 다를 수 있고, 1차 배출에서의 주요 배출원이 다르거나 2차 생성의 주요 전구물질의 배출 경향이 다를 수도 있다. 지역에 따라 국내 배출 요인과 외

부 영향의 기여도가 다를 수도 있고, 기상 조건에 따른 차이도 있을 수 있다.

가시거리도 지역별 차이를 보이고 있다(그림 6). 가시거리는 미세먼지 농도에 영향을 받으며(Seinfeld and Pandis, 2016), 미세먼지 농도와 주로 반대 경향을 나타낸다. 2000년대 초반 거의 유사했던 울산과 전주의 가시거리는 2000년대 중반 이후 다른 추이를 나타내어 울산 가시거리는 PM_{10} 농도와 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 빈도분율의 감소 추이와는 반대로 증가하였고 전주의 가시거리는 증감 추이를 뚜렷하게 나타내지 않았다. 서울의 가시거리는 1980년대 이후 전반적으로 개선되었다.

하지만 이런 지역별 차이가 있다는 점이 2013년부터 전국적인 미세먼지에 대한 국민들의 관심을 높이는 데 기여했을 것이라고 보기는 어려울 것으로 판단된다. 그림 7에서 일부 지역(서울, 울산)에 대해 PM_{10} 고농도 빈도비율 추이를 선형회귀식을 이용하여 살펴보았다. 월평균 PM_{10} 자료를 이용하여 2001년부터와 2013년부터로 구분하여 자료가 확보된 2018년 6월까지 선형회귀식의 기울기를 이용하여 추이의 증감율을 살펴보았다. 기간 선정에 따라 통계 분석 결과가 달라질 수 있으므로 2013년을 전후하여 2012년, 2013년, 2014년부터 어떻게 변화하였는지를 살펴보았다(그림 7).

2013년부터 2018년 6월까지 PM_{10} 이 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도비율 추이를 선형회귀식으로 나타내면 서울은 기울기가 모두 음수로 각각 -0.65×10^{-5} , -1.35×10^{-5} 이다. 2001년부터 2018년 6월까지의 기울기도 -5.10×10^{-5} , -2.91×10^{-5} 이지만 더 작은 절대값을 나타내어 감소율이 줄어들었다는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 2012년부터 2018년 6월까지의 기울기는 각각 0.54×10^{-5} , -0.79×10^{-5} 으로 PM_{10} 이 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도비율의 경우 양의 값으로 증가 추이를 나타내었고, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도비율도 2001년 및 2013년부터 2018년 6월까지에 비해 더 작은 절대값을 나타내어 감소율이 줄었다.

2014년부터 2018년 6월까지의 기울기는 각각 -1.41×10^{-5} , -1.78×10^{-5} 으로 PM_{10} 이 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도비율이 모두 2013년부터 2018년 6월까지에 비해서는 더 큰 절대값을 나타내어 감소율이 커졌지만, 2001년부터 2018년 6월까지에 비해서는 더 작은 절대값을 나타내어 감소율이 작아졌다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 서울의 사례에서는 2013년 전후부터의 미세먼지 고농도 빈도비율 감소 추세는 그 이전에 비해 약화되거나 오히려 증가하여 미세먼지 문제가 개선되었다고 느끼기 어려운 상황이었던 것으로 예상된다. 이 결과는 단순 선형회귀식을 이용하여 분석을 하였고, 통계적으로는 시작점을 임의로 정했다는 한계가 있지만, 어느 기간을 정해 살펴보는지에 따라 증감 추이와 크기가 달라질 수 있다는 점을 확인할 수 있었다. 국민들의 미세먼지에 대한 관심이 2013년 가을부터 급증하였으므로(그림 1), 2013년부터의 추이를 2001년부터와 비교하여 살펴보는 것이 국민의 미세먼지 문제에 대한 관심 증가 원인을 추정하기에 가장 적합할 것으로 판단된다.

한편, 모든 지역이 서울처럼 2013년 이후 감소 추세가 약화된 것은 아니다. 예를 들어, 울산은 2013년부터 2018년 6월까지 PM_{10} 이 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도비율 추이를 선형회귀식으로 나타내면 기울기가 각각 -4.81×10^{-5} , -2.01×10^{-5} 으로 2001년부터 2018년 6월까지 기울기인 -1.16×10^{-5} , -1.04×10^{-5} 보다 더 작은 절대값을 나타내어 감소율이 커졌다(그림 7).

2012년부터 2018년 6월까지의 기울기는 각각 -3.16×10^{-5} , -1.37×10^{-5} 으로 2001년부터와 2013년부터 2018년 6월까지의 기울기 사이에 해당하는 감소율을 나타내었다. 2014년부터 2018년 6월까지의 기울기는 각각 -4.58×10^{-5} , -2.34×10^{-5} 으로 PM_{10} 이 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도비율에 대해서는 2001년부터와 2013년부터 2018년 6월까지의 기울기 사이에 해당하는 감소율을 나타내었고, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 빈도비율에 대해서는 모든 기간 중 가장 큰 감소율을 나타내

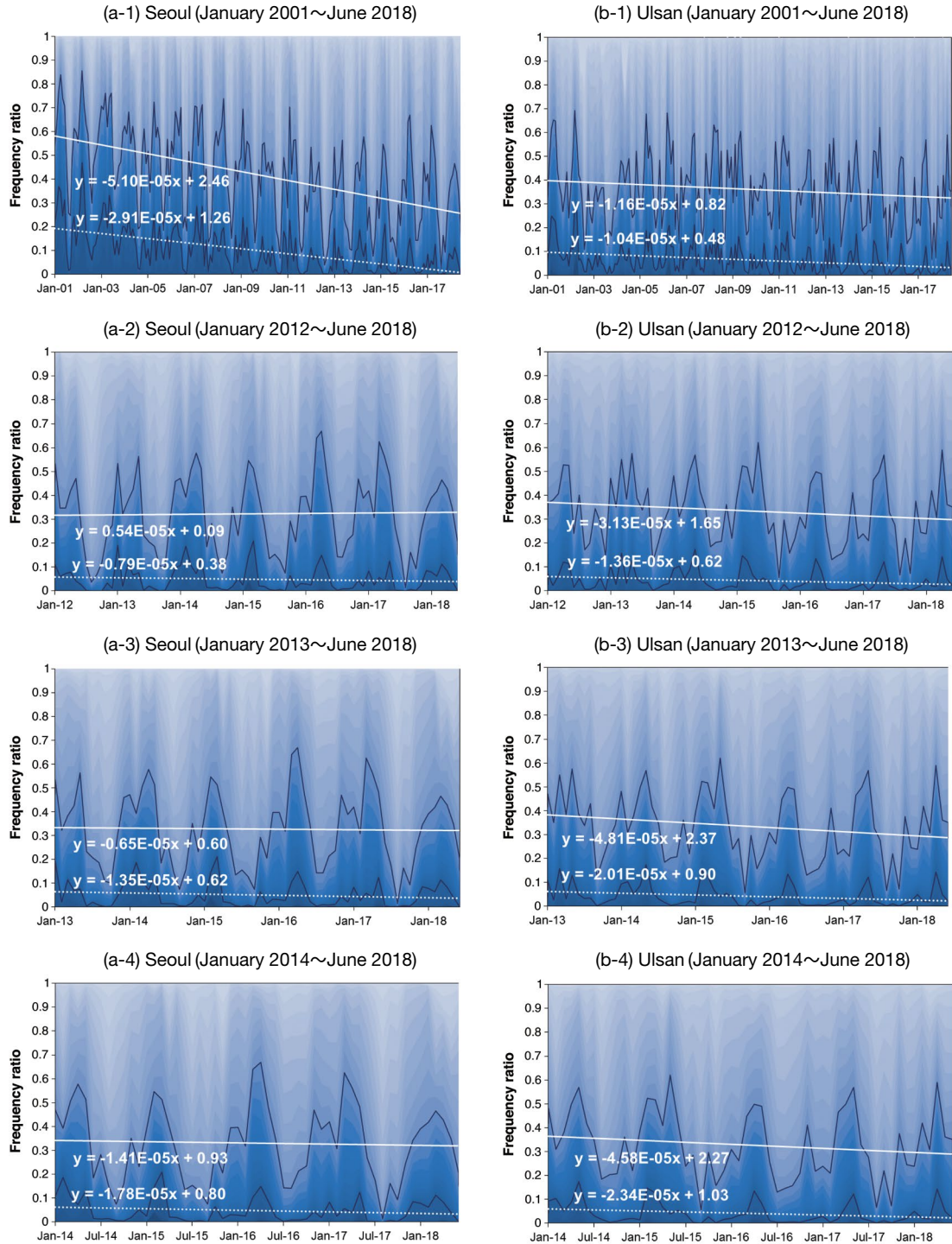


Fig. 7. Monthly PM₁₀ frequency ratio by the concentration level (bold lines for $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (first dark line), $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (second dark line) and linear regression lines for $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (solid white line), $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (dashed white line) in Seoul and Ulsan (raw data: KECO, 2019).

었다.

이를 통해, 2013년을 전후하여 PM_{10} 고농도 빈도 비율의 감소율이 줄어들거나 증가 추이를 보여 국민들의 체감도에 영향을 주었을 것으로 예상되는 지역도 있지만, 오히려 2013년 이후 감소율이 증가한 지역도 있어 2013년을 전후한 증감율에도 지역별 차이가 있다는 점을 확인할 수 있었다.

3.3 PM_{10} 고농도 발생 연속일수별 빈도수 추이

우리나라 전반적으로 미세먼지 고농도 발생 빈도 비율이 감소하였지만, 미세먼지 고농도 발생 연속일수별 빈도수가 증가하여 국민 불안에 기여했을 수도 있다. 지역별로 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이었던 날의 빈도수를 표 3에, 연속일수별 (3~10일) 빈도수 추이를 그림 8에 제시하였다.

PM_{10} 연평균 농도 및 농도구간별 빈도비율과 유사하게 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이었던 날의 빈도수(표 3)도 2012년에 대체로 가장 낮았고, 16개 모든 지역에서 2012년에 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 3일 이상 지속된 경우(그림 8)는 없었다. 2001년부터 2017년까지 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이었던 날 또는 3일 이상 지속된 빈도수는 모든 지역에서 전반적으로 감소하는 추이를 나타내었다.

이를 통해, PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이었던 날 또는 3일 이상 지속된 빈도수 또한 국민 체감도와는 달리 감소하였다는 것을 확인할 수 있었다.

표 3과 그림 8을 보면, PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이었던 날과 3일 이상 지속된 빈도수는 서울, 인천, 경기의 수도권 지역이 가장 높았다. 서울은 2001년 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날이 63일로 2001년부터 2017년까지 전 기간에 걸쳐 모든 지역에서 가장 높은 값을 나타내었고(표 3), 2002년 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 3일 이상 지속된 빈도수도 11회로 전 기간에 걸쳐 모든 지역에서 가장 높은 값을 나타내었다(그림 8). 2001년부터 2017년까

지 전 기간 동안 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날은 경기가 579일로 가장 많았고, 그 다음으로는 서울과 인천이 각각 487일과 425일로 많았다. 하지만 수도권 지역도 2013년 이후 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이었던 날과 3일 이상 지속된 빈도수는 감소하였다.

수도권 다음으로 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날과 3일 이상 지속된 빈도수가 높은 지역은 수도권 풍하지역에 해당하는 충북과 강원으로 2000년대 초반에는 수도권 지역보다 낮은 빈도를 보였지만, 2000년대 중반 이후에는 수도권과 유사한 수준(PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날은 연간 30일 이상, 3일 이상 지속된 빈도수는 연간 4~6회 가량)의 빈도수를 나타내었다.

다른 지역들은 수도권과 수도권 풍하지역에 비해 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날이 적었으며 연간 10일 이하인 경우가 많았다. 부산, 대구, 전북의 경우 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 3일 이상 지속된 빈도수는 2000년대 초반에는 연간 5~6회 가량으로 비교적 높은 값을 나타내었으나 2000년대 중반 이후 연간 4회 미만의 빈도를 나타내었고, 다른 지역들은 2001년부터 2017년까지 연간 4회 미만이었다.

부산, 대구, 충북은 2001년부터 2017년까지의 전체 기간 중에 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 10일간 지속된 경우가 1회씩 있었고, 다른 지역들은 6~9일간 지속된 경우가 최대였다.

PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 3일 이상 지속된 빈도수가 가장 낮은 지역은 대전과 전남으로 2001년부터 2017년까지 연간 2회가 최대였으며, 충남과 경남은 연간 3회가 최대였다. 특히 전남의 경우 2001년부터 2017년까지 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 지속된 최대일수가 4일로 16개 지역 중 가장 짧았고, 2001년부터 2017년까지 전 기간 동안 PM_{10} 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날도 110일로 가장 적었다.

이를 통해 미세먼지 고농도 발생 연속일수별 빈도

Table 3. Annual frequency of the number of days with the PM₁₀ level over 100 µg/m³ by region. Values more than 30 are shaded darker and less than 10 are shaded. Maximum and minimum values between 2001 and 2017 by region are in red and blue, respectively (raw data: KECO, 2019).

Regions	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Sum
(a) Seoul	63	57	57	33	38	31	49	28	28	19	17	5	16	20	11	7	8	487
(b) Incheon	35	20	30	28	46	47	47	29	32	25	19	9	16	18	13	5	6	425
(c) Gyeonggi	58	48	53	46	49	52	52	33	34	25	23	10	23	28	20	10	15	579
(d) Busan	26	46	19	23	22	22	20	14	14	10	8	3	8	12	6	7	4	264
(e) Daegu	40	50	26	10	12	12	12	20	14	19	10	0	11	8	4	5	4	257
(f) Gwangju	32	17	2	9	20	30	19	21	20	26	10	1	9	12	10	8	6	252
(g) Daejeon	17	17	8	11	11	15	20	14	10	18	9	3	8	10	9	5	7	192
(h) Ulsan	22	20	0	6	6	16	14	21	15	10	15	6	7	11	10	5	3	187
(i) Gangwon	20	24	37	33	34	33	27	27	18	21	17	5	19	23	13	4	5	360
(j) Chungbuk	48	24	30	25	13	23	37	26	37	42	26	10	30	22	13	7	6	419
(k) Chungnam	21	18	9	17	15	10	28	18	18	18	9	5	8	12	9	6	7	228
(l) Jeonbuk	40	20	7	5	10	27	31	17	26	19	15	10	20	16	19	11	11	304
(m) Jeonnam	16	15	2	2	1	3	9	13	11	6	6	1	6	6	3	7	3	110
(n) Gyeongbuk	15	21	17	21	13	12	14	14	9	11	12	4	11	13	6	4	4	201
(o) Gyeongnam	15	17	9	17	16	13	10	16	7	8	9	2	11	13	6	7	3	179
(p) Jeju	25	31	10	14	10	12	15	15	15	21	10	3	11	18	12	5	4	231

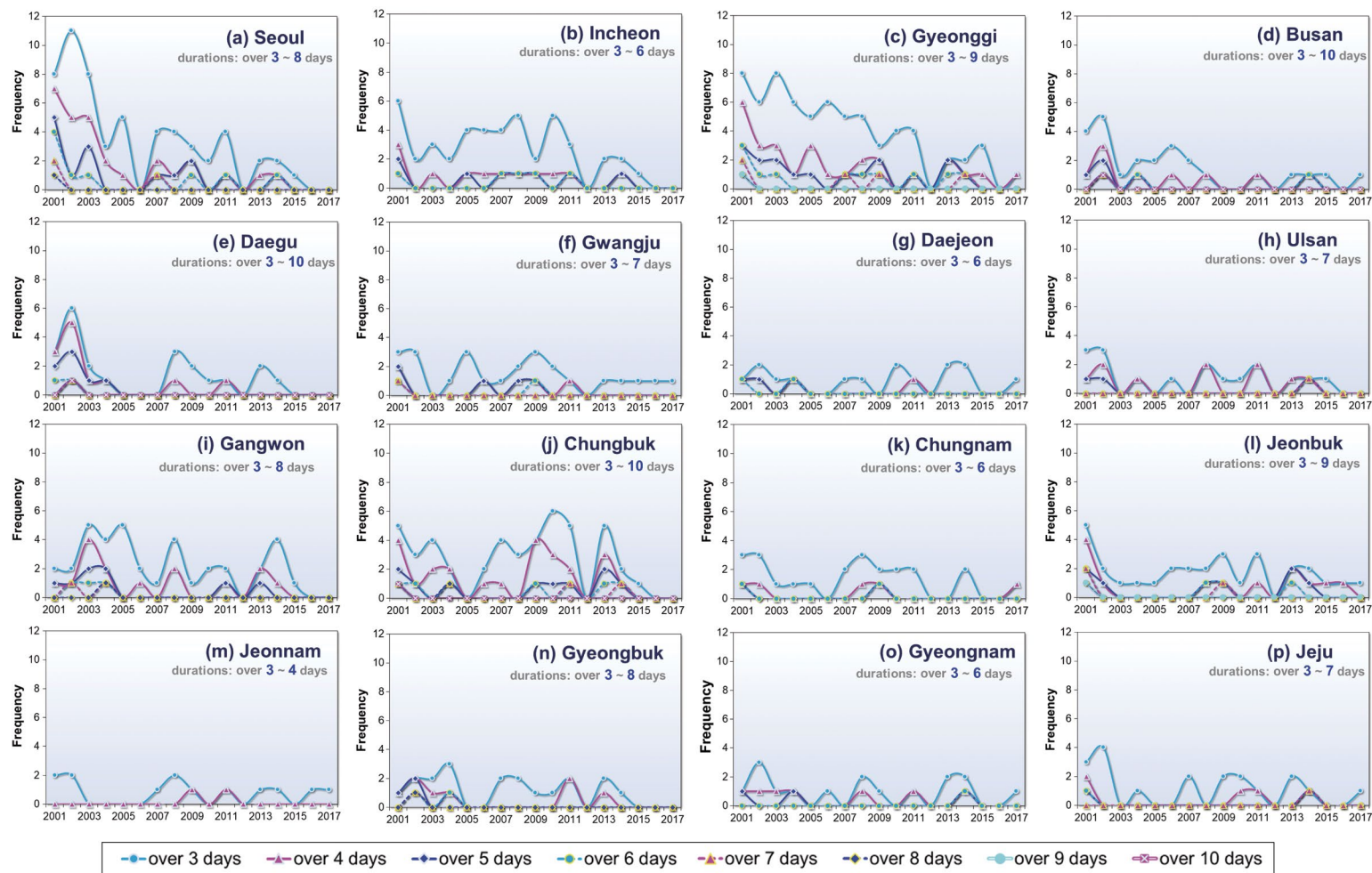


Fig. 8. Annual frequency over 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for duration for PM_{10} (durations: between over 3 days and over 10 days, respectively) (raw data: KECO, 2019).

수도 전반적으로 감소했다는 점과 수도권 및 수도권 풍하지역, 남부지역 등 지역별 차이가 있다는 점을 확인할 수 있었다. 이처럼 지역별로 다른 추이를 보이는 것이 국지적인 특성에 의한 것인지, 권역별 차이인지 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 미세먼지에 대한 국민의 관심과 불안이 급증하기 시작한 2013년 전후로 미세먼지 농도와 농도구간별 빈도분율, 고농도 발생 연속시간 추이에 차이가 발생했는지를 파악하기 위해 2001년부터 2017년까지 이들의 추이를 살펴보았다. 결과 전반적으로 모든 항목은 증가하지 않았다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이는 표면적인 농도 추이만을 가지고 판단한 것으로, 현상적인 원인 유무를 확실하기 위해서는 미세먼지 발생 원인과 현상에 대해 물리화학적인 특성 등이 밝혀져야 한다.

그럼에도 본 연구를 통해 지역별 PM_{10} 농도, 고농도 발생 빈도 및 고농도 발생 연속일수 추이에는 차이가 있으며, 지역별 미세먼지 농도에 영향을 주는 요인이다를 것이라는 점을 예상할 수 있었다. 같은 수도권 지역임에도 불구하고 인천은 2001년부터 2017년까지 중 2006년 PM_{10} 농도 및 고농도 빈도분율이 가장 높아 2002년 PM_{10} 농도가 가장 높았던 서울 및 경기와 다른 추이를 나타낸 것, 우리나라 남쪽 지역에 해당하는 영남, 호남, 충남(대전 포함)의 PM_{10} 농도 및 고농도 빈도분율이 급감한 것에 대해서는 보다 상세한 분석이 필요하다.

수도권 풍하지역에 해당하는 강원과 충북의 특성에 대해서도 추가적인 분석이 필요하다. PM_{10} 농도 및 농도 빈도분율, 고농도 발생 연속일수별 빈도수 증감추이의 정확한 판단을 위해서는 통계분석이 필요하며, 이처럼 지역별로 다른 추이를 보이는 것이 국지적인 특성에 의한 것인지, 권역별 차이인지 연구가 필요하다.

우리나라 PM_{10} 연평균 농도 저감에 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 고농도 발생 빈도가 줄어든 것이 기여했다는 점도 파악할 수 있었다. 하지만 미세먼지 고농도 사례는 국민 체감도에 크게 영향을 줄 수 있으므로 앞으로도 적극적으로 고농도 발생 빈도를 줄이기 위한 대책이 필요하다. WHO에서 제시하는 PM_{10} 연평균 기준인 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에 해당하는 빈도보다는 주로 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에 해당하는 빈도가 증가한 것을 통해 앞으로 PM_{10} 농도를 개선하기 위해서는 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이의 빈도를 줄이기 위한 방안이 필요하다는 것도 확인할 수 있었다.

본 연구에서 지역별로 미세먼지 고농도 발생 빈도 및 고농도 발생 연속일수 추이를 파악하였지만, 미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 미세먼지 발생 원인 및 현상에 대한 연구가 필요하다. 현재(고농도) 미세먼지 발생 원인 및 현상에 대한 연구가 강도 높게 진행되고 있다. 2016년 11월 미세먼지 대응 기술 분류 체계가 3개 대분류, 10개 중분류, 25개 세부기술로 확정되었고, 첫 번째 대분류인 현상 규명 및 예측 분야에서 미세먼지 발생 원인과 현상에 대해 2017년부터 미세먼지 사업단에서 본격적으로 연구를 진행하고 있으므로 빠른 시일 내에 이에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 미세먼지 문제로 인한 국민 불안이 증가하게 된 원인에 대하여 정부의 $PM_{2.5}$ 기준 설정 및 예보제 시행에 대한 발표, 언론의 영향, 국민들의 기대수준 향상 등 여러 가지에 대해 제시하였지만, 본 연구 결과만으로는 국민 불안의 원인을 명확하게 파악할 수 없었다는 점 또한 본 연구의 한계이다.

미세먼지 문제에 대한 국민 관심이 급증한 이유를 명확하게 파악하기 위해서는 본 연구와 같은 과학적인 접근뿐만 아니라 사회과학적인 접근을 통한 검토와 개선을 위한 대안제시가 필요하다. 또한, 국민들의 불안을 해소하기 위해서는(고농도) 미세먼지 발생 원인에 대하여 명확하게 제시해야 할 것으로 보인다. 하지만 미세먼지 고농도 현상은 오염물질의 배출 유무 등 일대일의 단순한 상관관계를 벗어나 대기 중의 여

러 기상현상과 연관된 복잡한 문제임을 명확히 인식하고, 이를 종합적으로 판단하는 것이 매우 중요하다 (NRF, 2018)는 점을 명심해야 한다.

본 연구는 미세먼지 농도 및 빈도수 추이를 최대한 장기간에 대해, 특히, 2013년 전후를 비교하여 살펴 보기 위해 PM_{10} 의 결과를 살펴보았는데, 이는 본 연구의 한계점이다. 최근 미세먼지는 건강을 위협한다는 측면에서 관심이 높는데, 미세먼지에 의한 $PM_{2.5}$ 의 건강 영향이 크므로 앞으로 $PM_{2.5}$ 에 대한 분석이 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업의 지원(NRF-2017M3D8A1092015)과 정부(미래창조과학부; 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2017R1A2B4006760; NRF-2017R1A6A3A11029726)을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Ban, J.H., Park, T.H., Park, S.M., Shin, H.-J., Lim, Y.-J., Choi, J.S., Lee, M.-D., Lee, S.-B., Kim, J.S., Lee, T.H. (2018) The ionic composition and acidity of $PM_{2.5}$ at Baengnyeong island during the high concentration episodes (2013~2014), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 780-791. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.6.780.
- ChungNam Institute (CNI) (2017) Study on the meteorological characterization of high concentration episodes of fine particles. Chungnam.
- Ghim, Y.S., Kim, C.H. (2013) Regional trends in short-term high concentrations of criteria pollutants from national air monitoring stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 545-552. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2013.29.5.545.
- Google (2019) Fine particles, <https://trends.google.co.kr/trends/> (accessed on Feb. 22, 2019). (in Korean)
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2013) IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Press release (N° 221). France.
- Kim, J., Ghim, Y.S., Han, J.-S., Park, S.-M., Shin, H.-J., Lee, S.-B., Kim, J.S., Lee, G. (2018) Long-term trend analysis of Korean air quality and its implication to current air quality policy on ozone and PM_{10} , *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 1-15. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.1.001.
- Kim, Y.W., Lee, H.S., Jang, Y.J., Lee, H.J. (2016) How does media construct Particulate Matter risks?: A news frame and source analysis on Particulate Matter risks, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 59(2), 121-154. (in Korean with English abstract)
- Korea Environment Corporation (KECO) (2019) Final confirmation annual data download, http://www.airkorea.or.kr/web/pastSearch?pMENU_NO=123 (accessed on Jan. 20, 2019). (in Korean)
- Korea Institute of Science and Technology (KIST) (2018) Study on the strategy for the fine particle technology development. Seoul. (in Korean)
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019) Synoptic observation data, <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36> (accessed on Jan. 24, 2019). (in Korean)
- Lee, Y.J., Jung, S.-A., Jo, M.-R., Kim, S.-J., Park, M.-K., Ahn, J.-Y., Lyu, Y.-S., Choi, W.-J., Hong, Y.-D., Han, J.-S., Lim, J.-H. (2014) Characteristics of PM chemical component during haze episode and Asian dust at Gwang-ju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(5), 434-448. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2014.30.5.434.
- Ministry of Environment (MOE) (2013) Press release: Introduction of fine particle forecasting system, problems and measures. Seoul. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE), National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Guidelines for air pollution monitoring network installation and operation. (in Korean)
- National Academy of Engineering of Korea (NAEK), The Korean Academy of Science and Technology (KAST), National Academy of Medicine of Korea (NAMK) (2017) Problem and solution of fine particle: ① What is the problem of fine particle? Seoul. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Annual report of air quality in Korea, 2017. Incheon. (in

- Korean)
- National Research Foundation of Korea (NRF) (2018) Roadmap for reducing fine particles in Korea. Daejeon. (in Korean)
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, 3rd Ed., John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
- Seoul Institute (SI) (2018) Analysis and application of meteorological patterns in high $PM_{2.5}$ episode in Seoul. Seoul. (in Korean)
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2019) Air quality trends, http://cleanair.seoul.go.kr/air_pollution.htm?method=average (accessed on Feb. 26, 2019). (in Korean)
- Shin, H.J., Park, J.S., Song, I.H., Lim, H.B., Kim, H.W., Park, S.M., Shin, S.A., Lee, J.B. (2018) The characteristics of secondary aerosol formation in high $PM_{2.5}$ episode occurred in March, 2018, KOSAE 61st Annual Conference 2018 Proceedings, 2018.10, 104-104. (in Korean)
- Song, G.Y. (2018) Surviving from fine particles. Symposium on commemorating the founding of the Fine Particle Center, Korea Green Foundation in February, 2018, Seoul. (in Korean)
- Yonhap News Agency (YNA) (2019) Fine particle ② Has it been worse than before or improved?, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20190117053800502> (accessed on Apr. 5, 2019). (in Korean)

Authors Information

여민주 (이화여자대학교 환경공학과 연구교수)
 김용표 (이화여자대학교 화학신소재공학과 교수)