

격자 기반 공간보간 기법을 활용한 국내 PM10 자료의 시공간적 변동성 분석

Spatiotemporal Analysis of Variability in Domestic PM10 Data Using Grid Based Spatial Interpolation Method

이진욱* · 변종윤** · 황승현*** · 전창현**** · 백종진*****

Lee, Jinwook*, Byun, Jongyun**, Hwang, Seunghyun***, Jun, Changhyun****, and Baik, Jongjin*****

Abstract

This study analyzed spatiotemporal variability in domestic PM10 data from 2001 to 2019. From annual numbers of stations between 175 and 484, the point data at each station were spatially interpolated using the inverse distance weighted method. A periodic variability in daily mean data was examined through wavelet analysis, which showed that there was a clear annual pattern with the periodic change following a regular cycle. The Mann-Kendall Test for monthly and annual mean data showed a decreasing trend in about $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per year. The spatial change in the grid data for annual mean data represented that it was relatively higher in the northern regions than that in the southern regions and its mean and deviation decreased significantly over time. For the entire period of observation data, it was found that annual mean and standard deviation of PM10 concentrations were relatively high in the region near the metropolitan area.

Key words : Particulate Matter, Spatial Interpolation, Wavelet Analysis, Mann-Kendall Test, Spatiotemporal Variability

요 지

본 연구에서는 2001년부터 2019년까지 관측된 국내 PM10 자료에 대한 시공간적 변동성 분석을 수행하였다. 이를 위해 연도별로 최소 175개에서 최대 484개의 지점 자료를 역거리가중법을 이용하여 공간보간하였다. 웨이블릿 분석을 통해 일평균 자료에 대한 주기적 변동성에 대해 검토한 결과, PM10은 약 1년 정도의 기간을 두고 규칙적으로 반복하는 것을 확인할 수 있었다. 월평균 및 연평균 자료에 대해 Mann-Kendall 검정을 적용한 결과, 1년에 약 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 감소하는 추세를 보임을 확인하였다. 연평균 자료를 이용하여 격자 단위의 공간적 변화를 살펴본 결과, 북쪽으로 갈수록 상대적으로 PM10이 높게 나타났으며 시간이 지남에 따라 절대적인 관측값 및 편차가 상당히 감소된 것을 확인할 수 있었다. 전체 기간에 대한 연평균 자료들의 평균은 수도권 부근이 상대적으로 높은 것으로 확인되었으며, 표준편차에서도 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 미세먼지, 공간보간, 웨이블릿 분석, Mann-Kendall 검정, 시공간적 변동성

*정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 연구교수(E-mail: jinwook213@cau.ac.kr)

Member, Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Chung-Ang University

**정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 석사과정(E-mail: whddb0932@cau.ac.kr)

Member, Master's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Chung-Ang University

***중앙대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 학부연구생(E-mail: hwanghnj@cau.ac.kr)

Undergraduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Chung-Ang University

****정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 조교수(E-mail: cjun@cau.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Chung-Ang University

*****교신저자, 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 연구교수(Tel: +82-2-820-5289, Fax: +82-2-812-6397, E-mail: jongjin@cau.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Chung-Ang University

1. 서론

최근 들어, 대기 중 미세먼지(particulate matter, PM)는 전지구적으로 심각한 대기오염 물질 중 하나로 인식되고 있다(Park et al., 2020). PM은 0.005~500 μm 의 크기를 가지고 있으며 오염원의 종류에 따라 각기 다른 크기를 가진다(Hwang et al., 2021). 이중 10 μm 이하의 미세먼지는 인체에 해로운 영향을 미칠 가능성이 높으며, 입자의 크기가 작아질수록 이러한 영향이 크다고 알려져 있다. 따라서 미세먼지의 크기를 상한계로 한 지표들이 등장하였으며, 이중 대표적으로 PM₁₀과 PM_{2.5}가 주로 사용되고 있다. 즉, PM₁₀과 PM_{2.5}는 각각 10 μm , 2.5 μm 보다 작은 미세먼지를 일컫는다. 10 μm 이하의 미세먼지는 공기 중에 부유 상태로 존재하면서 식물의 잎에 부착되어 잎의 기공을 막고 햇빛을 차단하여 동화작용, 호흡작용 및 증산작용 등을 저해하여 식물 생육에 악영향을 미친다. 뿐만 아니라 부유 상태의 미세먼지는 호흡을 통해 인체에 침입하여 기관지 및 폐에 부착된다. 이들 입자 중 일부는 김치, 재채기, 섬모운동 등에 의하여 제거되거나 일부는 폐포 등에 침착 및 축적되어 인체에 유해한 영향을 끼친다. 이러한 이유로 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 미세먼지를 1급 발암물질로 분류하기도 하였다(IARC, 2013).

국내에서도 이러한 PM을 저감하기 위해 다양한 정책적 노력들을 진행 중이다. 먼저, 2005년 특별법 제정을 통해 1차 수도권 대기환경관리 기본계획을 마련하였고, 이를 토대로 2차 계획(2015~2024)을 추진하고 있다(Kang, 2020). 2013년 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 대기 환경기준을 마련하였으며, 2018년에는 ‘미세먼지 관리 특별대책’을 수립하여 현재 추진 중이다. 2019년 정부는 미세먼지로 인한 피해를 사회재난으로 지정함에 따라 환경부 등 12개 관계부처 합동으로 2022년까지 미세먼지 국내 배출량 30% 감축을 목표로 한 로드맵을 발표하였다. 환경부에서는 해당 로드맵을 통해 핵심 배출원을 집중적으로 감축하여 2022년까지 국내 배출량의 31.9% 감축이 가능하다고 밝히기도 하였다.

대한민국 정부는 1984년부터 대기오염 중 먼지를 측정하기 시작했다. 당시에는 미세먼지(PM₁₀ 또는 PM_{2.5})를 직접 측정하는 것이 아니라 공기 중에 떠다니는 먼지의 총량(Total Suspended Particle, TSP)을 측정했다. 실제로 PM₁₀ 관측은 1995년 서울에서 시작되었다. 그러나, 대부분 지역들의 경우 2000년대에 이르러 관측을 시작하였다. 한편, PM_{2.5}의 경우, 서울에서는 2002년부터 관측을 시작했지만, 2013년에 이와 관련된 기준을 마련하였으며, 전국적으로는 2015년 정도부터 관측을 시작했다. 이처럼 PM_{2.5}의 짧은 관측 연한으로 인해 미세먼지의 장기적인 거동을 살펴보기 위해서는 PM₁₀을 활용할 수밖에 없기 때문에 대부분의 연구들 또한 PM₁₀에 대한 내용을 다루고 있는 실정이다.

최근 들어 PM에 관한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. PM과 관련된 연구는 주로 배출원 특성을 밝히고, 저감 대책을 세우기 위한 내용이 주를 이루고 있다(Lee et al., 2005; Hwang et al., 2009; Lim and Cho, 2017; Park and Shin, 2017; Kim et al., 2018; Lee et al., 2018). 그밖에 PM이 건강에 미치는 영향(Lee et al., 2014; Kim et al., 2017; Kim et al., 2018; Choi and Kim, 2018)이나 PM에 대한 위험 인식 및 인지에 관련된 연구(Choi and Kim, 2016; Kim and Han, 2019) 등도 찾아볼 수 있다. 이외에도 PM과 다양한 변수들 간의 영향관계 및 상관관계를 규명하고자 한 연구들도 쉽게 찾아볼 수 있다(Weng and Yang, 2006; Jin et al., 2014; Nguyen et al., 2015; Choi et al., 2019). 한편, 일부 연구들에서는 국내 PM의 시간적인 변화 양상을 살펴보거나, 이들의 지역적 차이를 살펴보기도 하였다(Yeo and Kim, 2019; Yoon, 2020; Sung, 2020; Park, 2021).

그러나 기존 미세먼지 대책의 실효성이나 보완적 조치의 필요성 등을 판단하기 위해서는 PM에 대한 시공간적인 분석이 매우 중요함에도 불구하고, 대부분의 연구들은 지점 자료들을 단순 평균하여 이를 해당 지역의 대표값으로 고려하였다. 일부 연구(Jeong, 2018; Jeong et al., 2021)에서는 PM의 공간 분포를 고려하였으나 단지 공간보간된 자료에 대한 유효성을 확인하는 정도에 그쳤다. 아울러 PM은 주기적인 경향이 있다고 알려져 있기는 하지만, 실질적으로 이러한 주기성에 대해 검토한 연구나 이러한 주기적 특성의 변화를 검토한 연구 또한 부족하다. Jang et al. (2012)과 같이 주기적인 특성에 대해 검토한 연구를 일부 찾아볼 수도 있으나, 해당 연구는 단순 지점 자료를 고려하였으며 관측 기간 내 주기적 특성이 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하였다는 한계가 있다. 정리하자면, 선행연구들은 공간 분포 및 주기적 특성을 개별적으로 다루고 있을 뿐 이를 동시에 고려하지는 못하였다. 아울러 경향성을 분석함에 있어 단순 선형회귀 분석을 수행한 연구들이 대부분이다. 이러한 경우, 주기적인 성격을 가진 자료에 대해 적용할 시 왜곡된 결과를 보일 수 있다. PM의 지속적 저감을 위한 체계적인 관리를 위해서는 공간적인 분포를 고려함과 동시에 이들의 주기성을 고려하여 경향성을 분석할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 상대적으로 장기간의 관측이 이루어진 국내 PM₁₀ 자료를 이용하여, 시공간적 변동성 분석을 수행하였다. 분석을 위해 일 평균 PM₁₀ 지점 자료를 격자 형태로 공간보간하여 평균하였다. 국내 전체 평균자료에 대한 이동평균, 주기적 변동성을 살펴본 후 주기를 고려한 경향성 분석을 수행하였다. 추가적으로, PM₁₀의 공간적 변화 특성도 살펴보았다.

2. 연구 자료

본 연구에서는 국내 PM₁₀ 자료를 분석 대상으로 하였다.

분석을 위해 관측자료의 제공시점인 2001년부터 2019년까지의 자료를 활용하였다. 먼저, 해당 기간 내 환경부에서 발간한 대기환경연보를 참고하여 각 연도별 관측소를 파악하였다. 2001년 최초 관측소(Unchanged)의 개수는 총 365개이며, 이후 신설된 관측소(Established)의 개수는 158개이다. 아울러, 2001년 이후 폐쇄된 관측소(Closed)는 5개이다. Table 1은 시도별로 이를 정리한 것이며, Fig. 1은 관측소들의 위치를 나타낸 것이다.

Fig. 1에서 확인할 수 있는 것처럼, PM 관측소는 주로 수도권 및 도시 지역에 집중되어 있었다는 점을 알 수 있다.

Table 1. Current Status of PM10 Observation Stations

Region	Unchanged	Established	Closed
Seoul	48	1	2
Busan	29	5	0
Daegu	14	4	1
Incheon	24	5	0
Gwangju	9	2	0
Daejeon	10	2	0
Ulsan	18	2	0
Sejong	0	4	0
Gyeonggi	91	19	0
Gangwon	12	14	0
Chungbuk	12	10	0
Chungnam	9	26	2
Jeonbuk	17	10	0
Jeonnam	19	21	0
Gyeongbuk	23	16	0
Gyeongnam	25	13	0
Jeju	5	4	0
Total	365	158	5

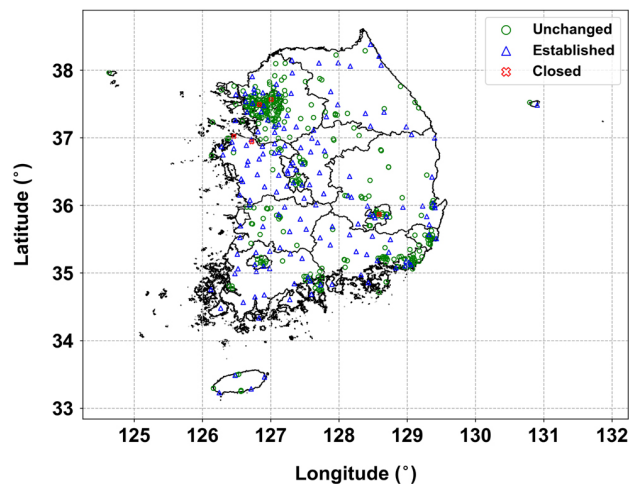


Fig. 1. Location of PM10 Observation Stations

이후 교외 지역에도 다수의 관측소가 신설되었지만, 관측망이 일부 지역에 편중되어 있어 전체적으로 보면 추가 설치가 필요하다고 볼 수 있는 지역이 많다고 할 수 있다.

이들 관측소들 중 일부 정제된 자료들을 한국환경공단의 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하고 있다. 에어코리아에서는 국가 및 지자체에서 운영하는 Fig. 1의 측정소로부터 국가대기오염정보관리시스템(National Ambient air quality Monitoring Information System, NAMIS)을 통해 원 자료를 수집하고 이상자료를 선별한 뒤 홈페이지를 통해 2001년부터의 최종확정 자료를 배포하고 있다. 해당 자료는 시간 단위로 제공된다. 본 연구에서는 각 관측소별 자료를 검토하여, 유효한 관측값이 존재하는 모든 관측소의 자료를 선별하였다. 그 결과, 연도별로 최소 175개에서 최대 484개의 관측소의 PM10 자료가 고려되었다.

이처럼 관측소가 균일하게 분포하고 있지 않으므로, 국내 전반적인 PM10의 변화를 살펴보기 위해서는 공간보간을 수행할 필요가 있다. 즉, 만일 지점 자료를 단순 평균하여 사용한다면, Fig. 1에서와 같이 집중적으로 관측이 이루어지고 있는 지역의 영향이 크게 나타나서 평균이 왜곡될 수 있다. 공간보간 시 WGS84 위경도 좌표계를 고려하였으며, 공간 해상도는 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 로 설정하였다. 보간을 위해서는 역거리가중법(Inverse Distance Weighted Interpolation, IDW)을 사용하였다. IDW는 관측 자료의 특성이 두 위치 사이의 거리에 반비례한다고 보는 지리학적 공간에 기반한 공간보간법 중 하나로 현재까지도 공간보간을 위해 널리 쓰이는 방법이다. 이때, 관측되는 변수가 0으로 관측되는 경우가 많다면, 단순 보간 시 0인 지역을 과소추정하게 되므로 추가적인 기법을 활용할 필요가 있다(Lee and Shin, 2021). Eqs. (1)과 (2)는 IDW 공간보간법을 수식으로 표현한 것이다.

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$W_i = \frac{1}{d_i^2} \quad (2)$$

여기서, Z_p 는 미세측 지점의 보간값이며, Z_i 는 주변 지점의 관측값을 의미한다. 아울러 n 은 IDW 적용을 위한 지점의 개수이다. W_i 는 가중치이며, 이는 Eq. (2)와 같이 해당 지점까지의 거리 d_i 의 제곱에 반비례하는 형태로 계산된다. 본 연구에서는 모든 지점의 정보를 고려하여 공간보간을 수행하였다. 최종적으로 일 단위의 변화를 살펴보기 위해, 앞서 공간적으로 보간된 시간 단위 자료를 일 단위로 변환하였다.

Fig. 2는 비교적 최근인 2019년 2월 4일에 대한 지점 자료와 IDW를 이용하여 공간보간된 자료의 표출 예시이다.

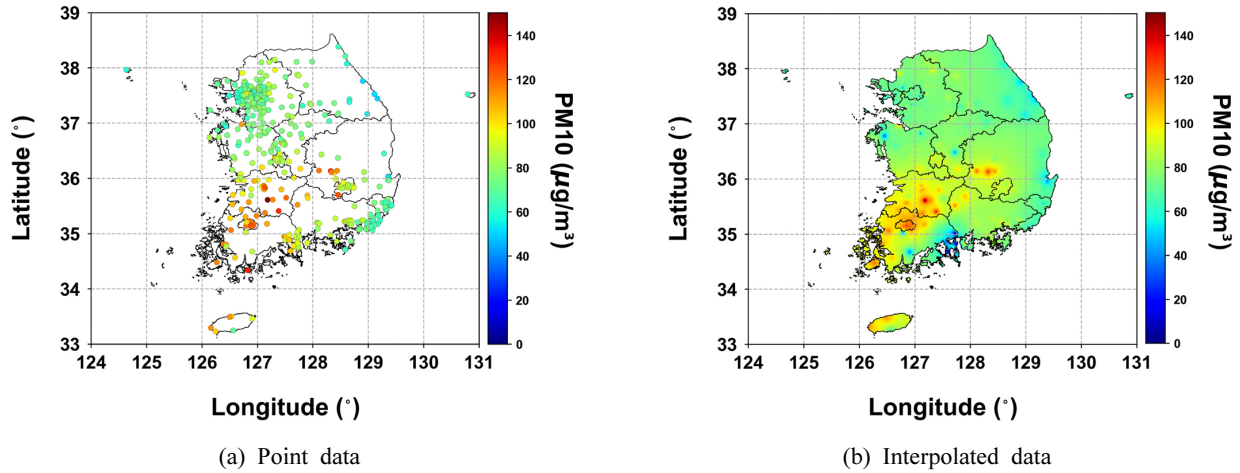


Fig. 2. Example of Spatially Interpolated PM10 Using the IDW Method

해당 그림을 통해 지점 자료가 고해상도의 공간자료로 원활하게 보강된 것을 확인할 수 있다. 관련 연구인 Jeong et al. (2021)에서는 유사한 방식으로 PM10 자료의 공간보간을 수행하였으며, 검증에 위해 선별적 임의추출을 통한 암맹평가를 실시하여 이에 대한 유효성을 확인하였다. 아울러 해당 일자(2019년 2월 4일)를 포함한 몇 가지 공간보간에 대한 예시를 보여주었다. 그 결과, Fig. 2(b)를 통해 확인되는 본 연구의 공간보간 결과와 Jeong et al. (2021)에서 제시한 결과가 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3. 연구 방법

3.1 Wavelet Analysis

웨이블릿 변환은 유한한 길이의 기저 함수(basis function)를 이용하여 기존의 시계열 자료를 주파수 도메인으로 변환한다. 따라서 푸리에 변환과 달리 웨이블릿 변환에서는 신호의 변화되는 부분을 잘 나타낼 수 있어, 신호의 불연속적인 지점을 식별하는 데에 유용하다.

웨이블릿 변환의 기저 함수를 모 웨이블릿(mother wavelet)이라 하며, 모 웨이블릿의 척도 변환(scaling) 및 전이(transition)를 통해 시간 도메인에 있는 기존 신호를 주파수 영역으로 변환한다. Eq. (3)은 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform, CWT)의 기본적인 공식이다.

$$W_x(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (3)$$

여기서, ψ 는 모 웨이블릿 함수를 나타내며 위첨자 *는 켈레 복소수(complex conjugate)를 의미한다. s 와 τ 는 모 웨이블릿 조정을 위한 매개변수를 의미한다. s 는 척도 매개변수(scale parameter)로 모 웨이블릿의 크기를 조정하며,

τ 는 전이 매개변수(transition parameter)로 모 웨이블릿을 시간축 상의 특정 위치로 이동시킨다. 아울러 $W_x(s, \tau)$ 는 s 와 τ 를 매개변수로 가지는 연속 웨이블릿 변환을 의미한다. $x(t)$ 는 시간축에 존재하는 입력신호를 의미한다. 웨이블릿은 실수 또는 복소수의 값을 가지기 때문에 크기 비교를 위해 $|W_x(s, \tau)|^2$ 으로 계산되는 wavelet power (WP)가 주로 사용되며, 스펙트럼이 강하게 나타나는 주기를 대략적으로 파악하기 위해 각 스케일별 WP를 평균한 global wavelet power (GWP) 또한 많이 활용된다.

웨이블릿 결과에 대한 정확한 해석을 위해서는 웨이블릿의 시간-주파수 도메인에 나타나는 척도(scale)를 실제 주기(period)로 변환해 주어야 한다. 고려되는 모 웨이블릿에 따라 둘 간의 비율은 다르게 나타난다. 본 연구에서는 척도와 주기가 거의 동일한 값을 가져 해석 측면에서 이점이 있는, Morlet 웨이블릿을 모 웨이블릿으로 채택하였다(Lee et al., 2019). 추가로, 웨이블릿 분석 결과는 모든 시간 영역에서 완벽하게 지역화될 수는 없기 때문에 Cone of Influence (COI) 개념이 유용하게 사용된다. 간단히 말해, COI는 가장 자리 효과(edge effect)가 무시될 수 없는 영역을 의미한다. 이 영역에서는 불확실성이 매우 크기 때문에 결과를 해석할 때는 특별한 주의가 요구된다. 본 연구에서는 Torrence and Compo (1998)를 참고하여 COI를 계산하고, 해당하는 영역을 연한 점선 및 음영으로 표시하였다.

3.2 Mann-Kendall Trend Test

시계열 자료의 경향성을 판단하는 통계학적 방법들은 크게 매개변수적 방법과 비매개변수적 방법으로 구분된다. 매개변수적 방법은 모집단 분포에 대한 가정을 포함하며, 비매개변수적 방법은 이러한 가정을 포함하지 않는다. 비매개변수적 방법은 순위에 모든 자료 간의 관계를 종합적으로 분석할 수 있기 때문에 결측값이나 계절성 등을 유연하게

고려할 수 있다는 장점이 있어, 매개변수적 방법에 비해 많이 사용된다(Hirsch and Slack, 1984).

비매개변수적 방법 중 하나로 Mann-Kendall Trend Test (MK Test)는 시계열의 증가 또는 감소, 즉 단조 경향성(monotonic trend)을 분석하는 데 사용되는 기법이다. MK Test는 Mann (1945)과 Kendall (1975)에 의해 제안된 방법이며, MK Test의 귀무가설(null hypothesis)은 분석 대상 시계열에 경향성이 존재하지 않는다는 것이다. 다만, 자료 자체에 계절성이 있는 경우에는 왜곡된 결과를 줄 수 있으므로 Seasonal Mann-Kendall Trend Test (SMK Test)가 사용된다(Hirsch et al., 1982).

MK Test 및 SMK Test에서는 상관계수인 Kendall's tau를 구하여 그 유의성을 검증함으로써 경향의 유무를 파악하고 이에 수반되는 Kendall's S를 구하여 경향성의 정도를 판단할 수 있다. Kendall's S가 양의 값을 가질 경우 시간에 따른 증가 추이를 의미하며, 음의 값을 가질 경우 감소 추이를 의미한다(Kim, 2008). 이후, Z값을 계산한 뒤, P-value를 구하여 경향성의 유의성을 판단하게 된다. 유의수준 α 가 0.05인 경우 P-value가 0.05보다 크거나 같으면 경향성이 없다는 귀무가설을 수용하며, 반대인 경우 귀무가설을 기각하고 대립가설을 수용한다. 통상 Test 수행 시 Sen's slope (Sen, 1968)라는 기울기를 추가적으로 산정한다. 해당 기울기를 이용하여 전체적인 자료의 경향성을 정량화할 수 있다.

4. 국내 PM10 일평균 자료에 대한 분석 결과

4.1 시간적 변동성

먼저, 국내 PM10의 전체적인 시간적 변동성을 살펴보았다. Fig. 3은 국내 전체에 대한 일평균 자료를 나타낸다. 여기서 황축의 눈금은 각 연도의 6월 30일에 표시하였으며, 점선을 이용하여 각 연도의 시작과 끝을 구분하였다. 이와

함께 국내 PM10 일평균 자료들의 연도별 기본 통계 특성을 정리한 결과는 다음 Table 2와 같다.

Fig. 3의 시계열 자료를 통해 확인할 수 있는 것과 같이 2002년, 2006년, 그리고 2007년 초에 고농도의 PM10이 관측된 것을 확인할 수 있다. 2010년대에 이후로는 2011년과 2015년에 유의하게 높은 관측값이 확인되지만, 이전의 값들 보다는 그 농도가 낮다.

Fig. 4는 10일, 50일, 100일, 200일을 기준으로 한 국내

Table 2. Annual Statistics of Daily Mean PM10 in Korea

Year	Mean	Std	Min	25%	50%	75%	Max
2001	60.4	30.9	21.1	42.0	52.4	66.4	255.7
2002	64.2	58.2	19.8	40.9	54.7	70.1	650.9
2003	57.2	23.9	22.3	40.4	52.7	68.8	152.4
2004	57.8	23.8	20.3	40.6	52.8	70.3	240.6
2005	56.2	22.7	18.3	38.8	52.3	69.3	153.6
2006	58.5	39.5	17.6	37.2	51.8	71.8	564.9
2007	57.8	38.8	15.7	38.0	50.5	68.5	594.1
2008	53.8	24.9	17.9	37.0	48.8	63.1	186.9
2009	53.1	26.7	14.7	36.4	47.3	60.3	216.5
2010	51.6	26.8	13.5	34.4	45.3	61.1	215.1
2011	50.2	29.0	12.6	33.0	45.5	59.1	315.4
2012	44.7	17.9	11.7	31.5	42.0	53.5	110.2
2013	48.4	21.3	18.6	33.2	44.0	57.5	145.8
2014	48.5	23.4	14.2	31.9	43.4	59.4	156.5
2015	47.5	27.0	10.2	32.6	44.2	55.3	374.1
2016	46.5	19.4	13.0	33.5	42.9	55.0	186.2
2017	45.0	19.4	12.9	31.6	42.9	53.2	184.7
2018	41.3	20.3	11.6	26.4	38.2	52.1	133.5
2019	41.3	20.8	7.8	27.7	36.8	48.4	154.0

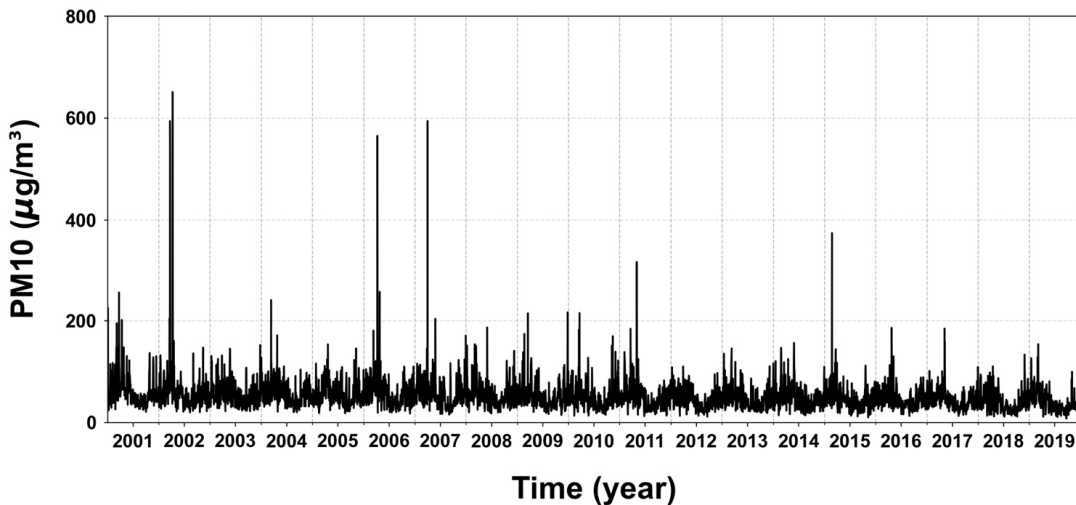


Fig. 3. Time Series of Daily Mean PM10 in Korea

PM10 일평균 자료의 이동평균(moving average, MA)을 보여 준다. 짧은 시간 단위에서는 변동성이 커서, 자료의 추세를 확인하기에는 다소 어려움이 있다. 그러나 50일 이상의 이동 평균을 통해 대략적인 감소추세와 주기성을 시각적으로 어느 정도 확인할 수 있다.

추가적으로 연중 계절에 따른 변화를 calendar plot을 통해 살펴보았다(Fig. 5). 이는 시각적인 비교를 위해 실제 달력을 격자화하여 강도를 색상으로 나타낸 그래프이다. Table 2를 통해 확인할 수 있는 것처럼 실제 최댓값은 $650.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이지만, 비교를 용이하게 하기 위해 국내 PM10 일평균 환경기준

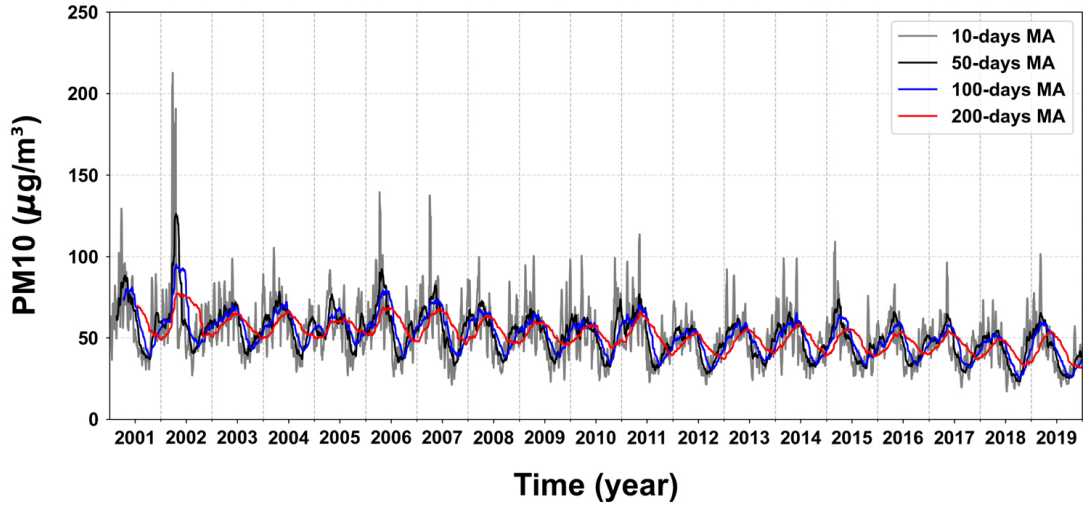


Fig. 4. Moving Average of Daily Mean PM10 in Korea

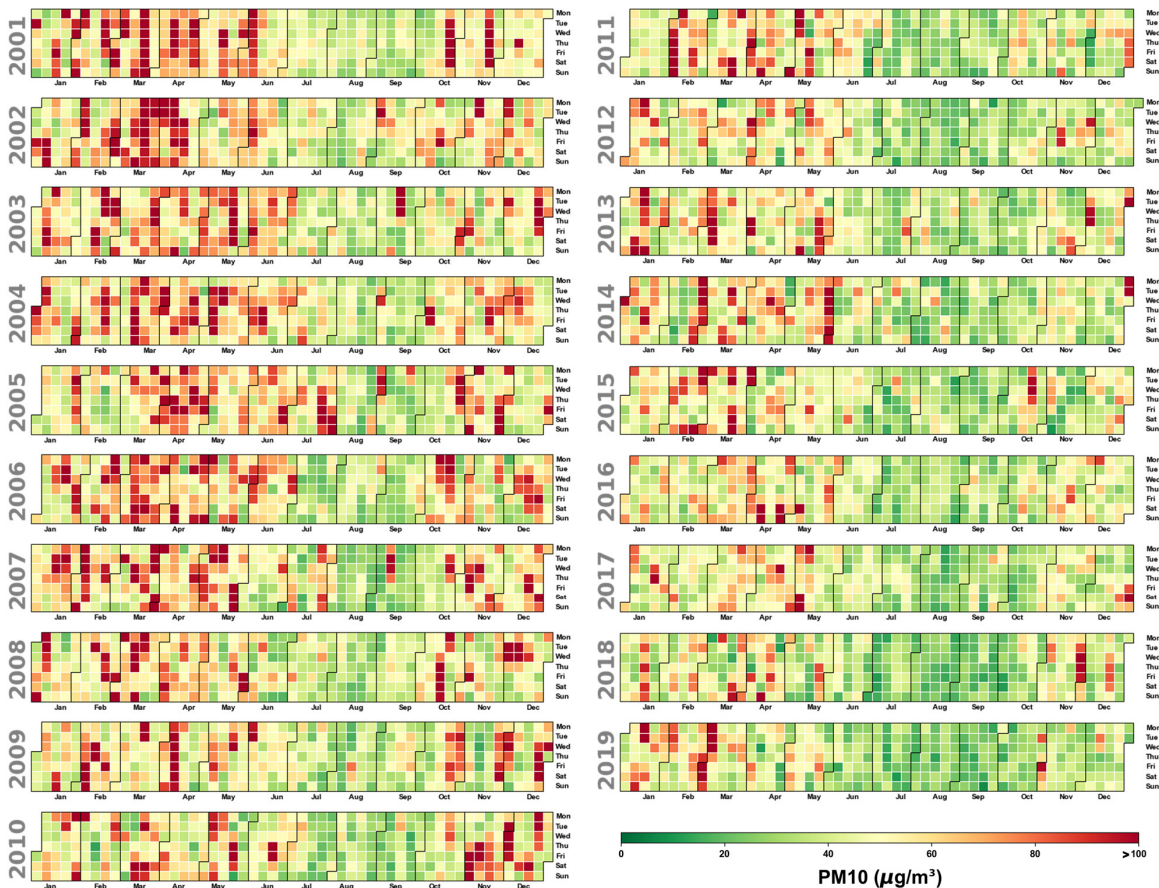


Fig. 5. Calendar Plot of Daily PM10 in Korea

인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 값들은 검붉은 색으로 동일하게 나타났다.

그 결과, 계절적인 차이와 시간에 따른 절대적인 값의 감소를 확인할 수 있다. 계절적 차이를 먼저 살펴보면, 봄철에는 대체로 농도가 높게 나타나며 이내 여름철에는 상당히 감소된 모습을 보여준다. 가을철 조금씩 증가하여 겨울철에 다시 고농도의 PM10을 확인할 수 있다. 겨울철에서 봄철로 이어지는 변화는 10월 중순부터 3월 후반까지 아시아 대륙에 영향을 미치는 대륙성 고기압과 관련이 깊다(Lee and Hills, 2003). 또한 겨울철은 복사냉각에 의한 접지역전층(surface inversion layer)이 강해지기 쉽고, 계절풍이 약하다면 대기확산이 어려워 PM10의 농도가 높아질 수 있다(Choi and Lee, 2012). 봄철에 나타나는 황사의 영향 또한 무시하기 어렵다(Jeon, 2003; Choi and Choi, 2008; Choi et al., 2010; Jeon, 2012). 한편, 여름에는 남풍 계열의 바람이 부는 경우가 많아 외부로의 유입이 감소할 가능성이 크며, 강수량의 증가로 인한 미세먼지의 저감 효과(Olszowski, 2016; Park et al., 2020) 또한 컸을 것으로 판단된다. 시간에 따른 감소는 국가적인 관심과 더불어 경유차 제한 등의 정책적인 효과가 작용했을 것으로 판단된다(Bae and Kim, 2016). 다만, 이러한 주기성과 추세를 단순히 시각적으로 단정짓기는 어렵다. 즉, 일련의 분석 과정을 거쳐 정량화된 주기성분을 확인하고, 이를 고려하여 추세에 대한 통계적 유의성을 정량적으로 검증할 필요가 있다.

4.2 주기적 변동성

국내 전체 격자에 대한 일평균 자료를 이용하여, 웨이블릿 분석을 수행하였다. 크기 비교를 위해 각 Scale별로 WP를 산정하였으며, 스펙트럼이 강하게 나타나는 주기를 대략적으로 파악하기 위해 각 스케일별 WP를 평균한 GWP 또한 함께 산정하였다(Fig. 6).

웨이블릿 분석 결과를 살펴보면, PM10은 과거부터 지금

까지 1년 정도의 시간을 주기로 반복되며, 이러한 반복은 매우 규칙적으로 나타난다. 이러한 미세먼지 농도 증감에 대한 주기성은 일부 연구에서도 언급된 바 있다(Tian et al., 2014; Park, 2021). 2000년대 일부 시간대에서는 매우 짧은 시간 동안 강한 스펙트럼이 확인되기도 한다. 이는 앞서 살펴보았던 고농도의 PM10 발생에서 기인한 것으로 보인다. 2000년대에서는 약 6개월 주기에서도 미세한 신호가 관찰되기도 하나, 이러한 신호는 2010년대에 이르러 약해지는 것 또한 확인할 수 있다.

본 연구에서는 자료들이 나타내는 연중 주기적 변동성에 대해서도 추가적으로 검토해보았다. Fig. 7은 각 연도별로 산정된 WP를 보여준다.

Fig. 7에서 확인할 수 있는 것처럼, 전반적으로 봄철의 변화가 가장 두드러진다. 이러한 변화는 대부분 약 한 달 이내의 주기성을 가지는 점 또한 확인된다. 그러나, 최근 들어 2014년(Fig. 7(n)), 2017년(Fig. 7(q))과 같이 한 달 이상의 장주기 성분도 관찰되기도 한다. 추가로, 가을철의 주기적 변동성은 Figs. 7(a)~7(e)와 같이 2000년대 초반에는 확인되나, 시간이 흐름에 따라 그 세기가 상대적으로 약해지는 것 또한 확인할 수 있다.

4.3 경향성 분석

월평균 자료와 연평균 자료를 이용한 경향성 분석을 수행하였다. 월평균 자료 분석을 위해 SMK Test를 활용하였으며, 주기는 앞서 웨이블릿 분석을 통해 확인한 1년(12개월)으로 설정하였다. 연평균 자료의 경우 단순 MK Test 방법을 활용하였다. Table 3은 분석 결과를 정리한 것을 보여준다.

Table 3의 결과에서 볼 수 있는 것과 같이, 월 자료와 연 자료에 대한 Sen's slope는 1년에 -1.014 , $-1.071 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 거의 유사한 것으로 확인되었으며, P -value를 통해 이러한 감소 경향의 유의성을 확인할 수 있다. 이는 1년에 걸친 변화로 해석할 수 있다. 해당 기울기를 반영하여, 월평균 및 연평균

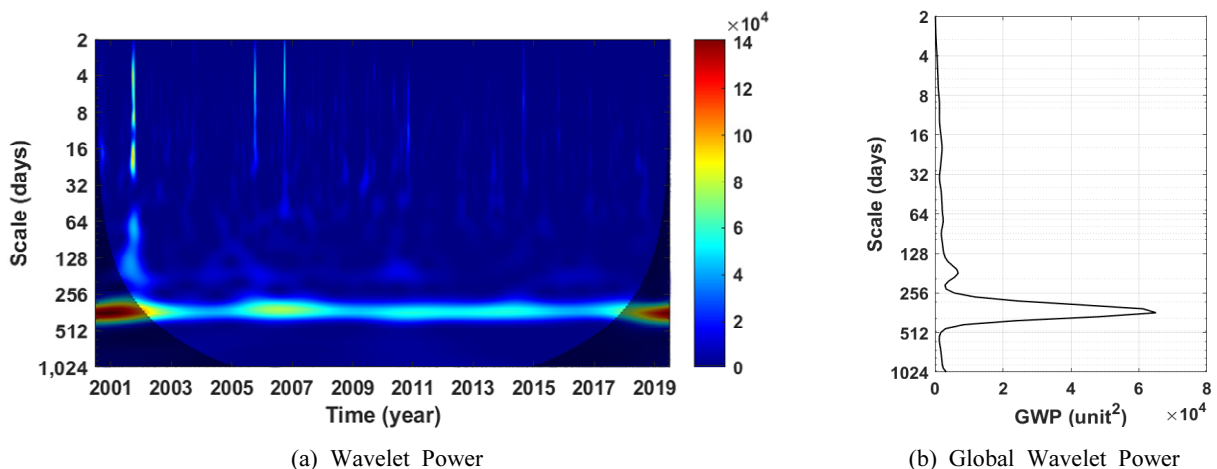


Fig. 6. Results of Wavelet Transform for Daily PM10 in Korea

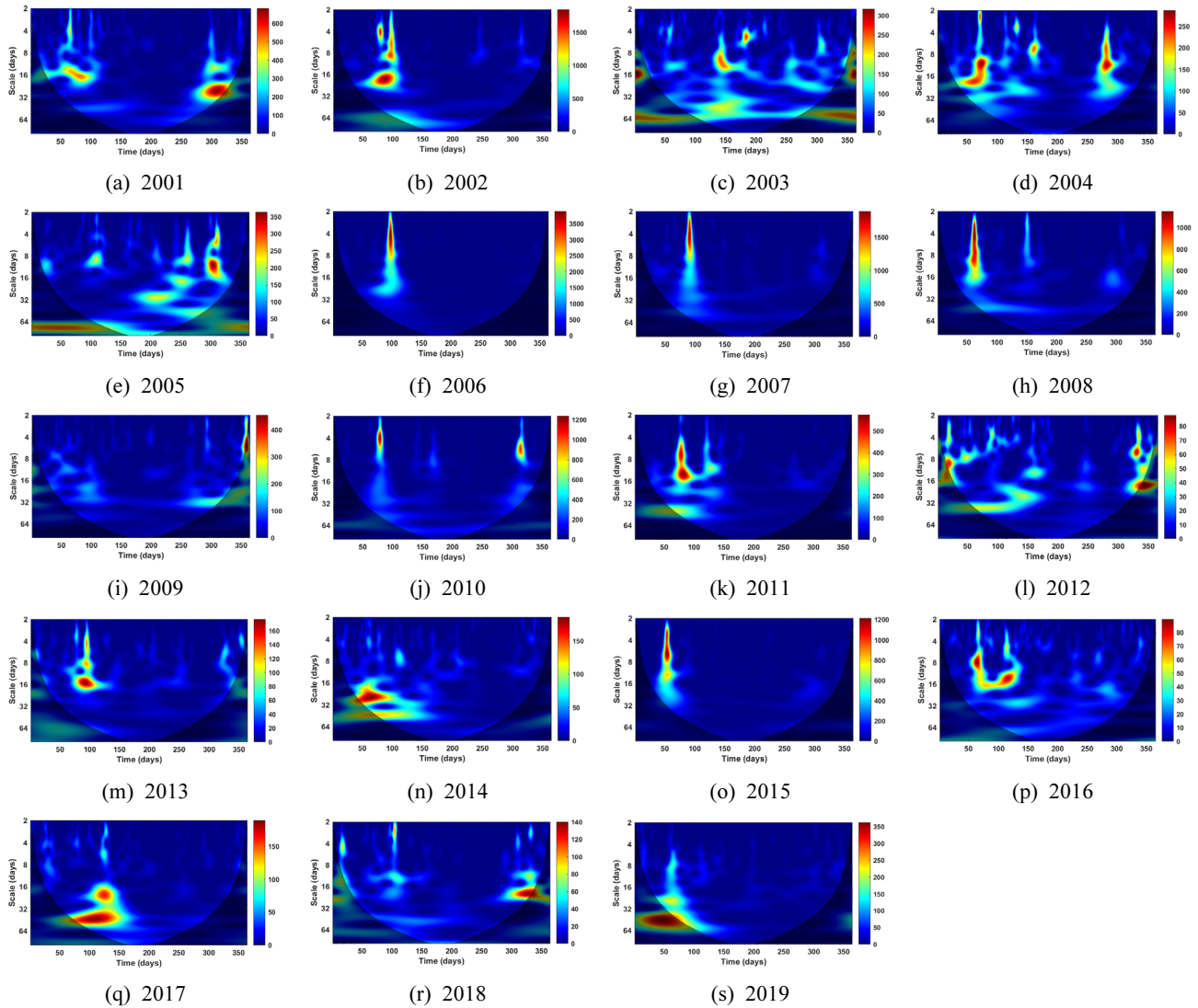


Fig. 7. Results of Wavelet Transform Each Year's Daily PM10 in Korea

Table 3. The Results of Seasonal Mann-Kendall Test for Monthly Mean PM10 and Mann-Kendall Test for Annual Mean PM10

Variable	Monthly Mean Daily PM10	Annual Mean Daily PM10
Kendall's S	-984.0	-143.0
Kendall's τ	-0.4795	-0.8363
Trend	Decreasing	Decreasing
Variation of S	9,804.0	817.0
P -value	<0.0001	<0.0001
Significant level	0.05	0.05
Test interpretation	Reject Null Hypothesis	Reject Null Hypothesis

자료의 시계열을 도시한 결과는 Fig. 8과 같다. 즉, 연평균 자료를 기준으로 19년 정도의 기간 동안 약 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 총 $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 감소가 일어났다.

다만, 여기서 이러한 결과가 미래에도 지속될 것을 보장하는 것은 아니라는 점은 주의할 필요가 있다.

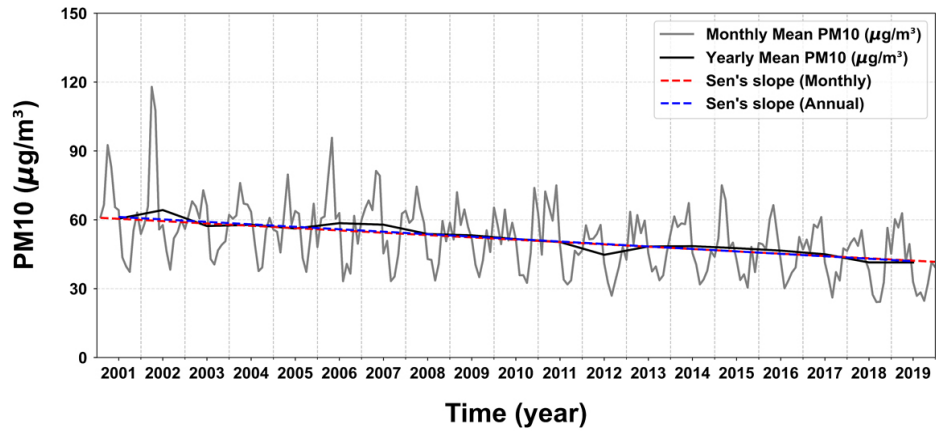


Fig. 8. Monthly and Annual Mean Daily PM10 and Trend Line with Sen's Slope

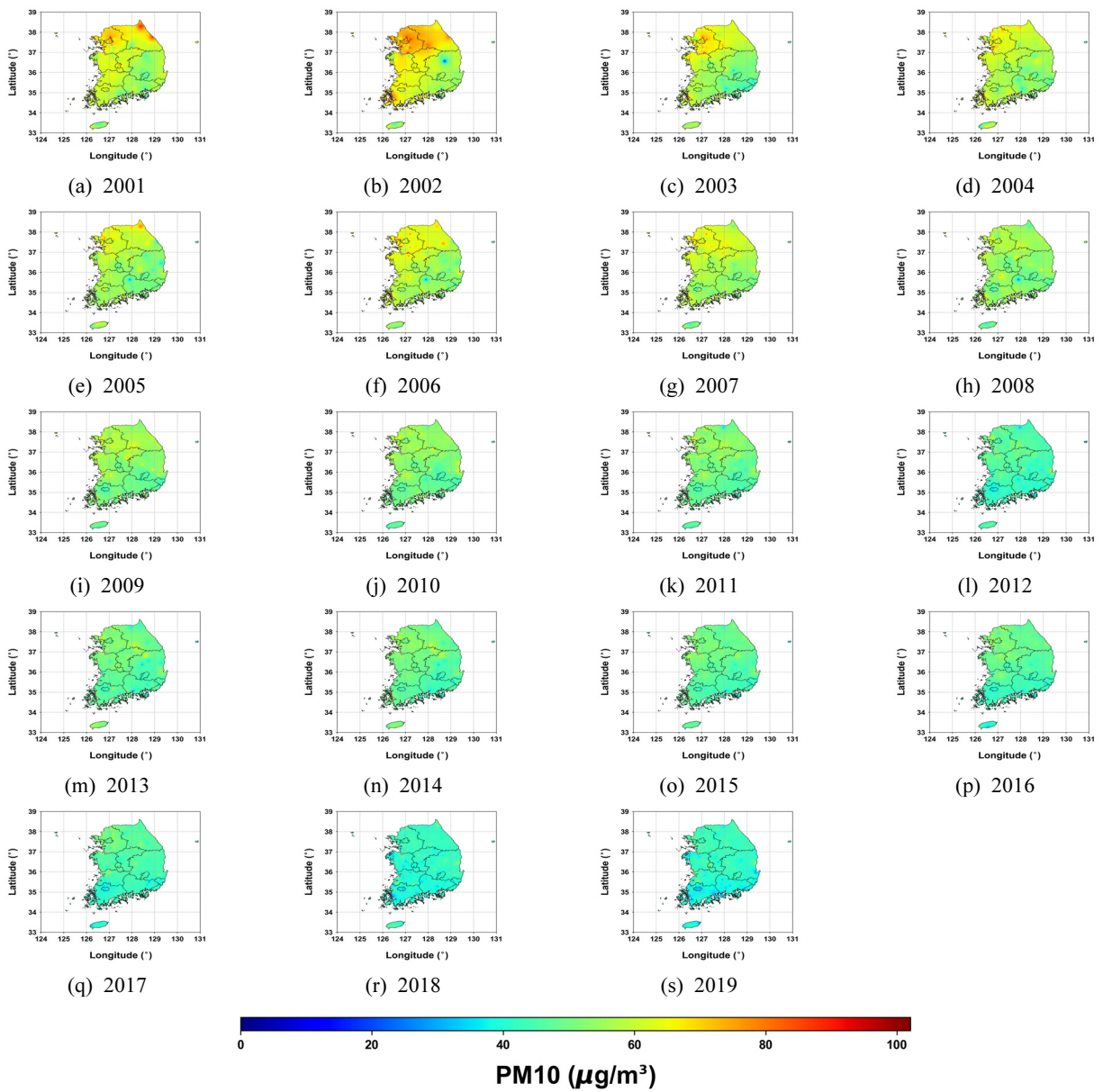


Fig. 9. Spatial Distribution of Annual Mean Daily PM10 in Korea

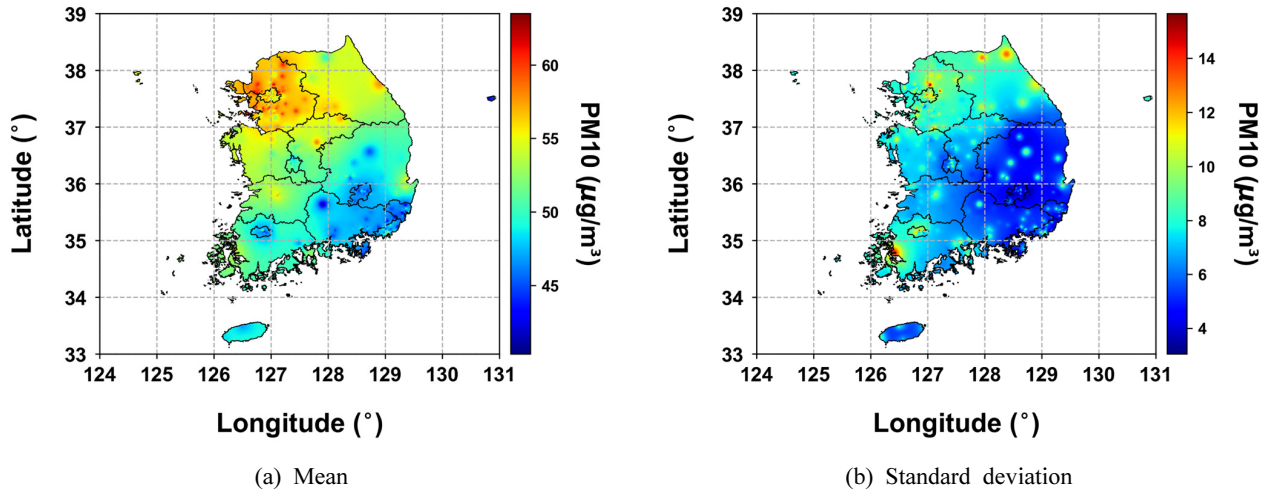


Fig. 10. Spatial Distribution of Mean and Standard Deviation of the Annual Mean Daily PM10 in Korea

5. 연평균 자료를 이용한 지역별 차이에 대한 분석

격자별 자료들의 연평균 변화를 살펴보았다. 즉, 해당 자료는 일 단위 자료에 대한 1년 전체의 평균값을 의미한다. 이들 중 최댓값은 2001년에 발생한 $102.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다. 이러한 범위를 고려하여 color bar를 설정하고, 지도상에 나타낸 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9를 통해 지역별 차이와 더불어 이들의 시간에 따른 변화 또한 살펴볼 수 있다. 남쪽보다는 북쪽에서의 PM10이 상대적으로 높게 나타난다. 아울러 이러한 지역적인 편차는 시간에 따라 작아지며, 절대적인 값들 또한 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다.

추가로 각 격자들의 2001~2019년 연평균 자료의 평균 및 표준편차를 살펴보았다(Fig. 10). Fig. 10(a)의 평균을 먼저 살펴보면, 과거 20여년 간의 PM10은 수도권 부근이 상대적으로 높은 것으로 확인된다. 이외에도 강원도 지역이나, 공업단지가 밀집되어 있는 경상도의 동해안 부근도 비교적 높은 PM10이 확인된다. 다음으로 Fig. 10(b)의 표준편차를 통해서도 유사한 경향을 확인할 수 있다. 비교적 수도권과 강원도, 즉 북쪽에 위치한 지역의 변동이 컸던 것으로 확인되며, 추가로 남서쪽에 위치한 전라남도 지역 또한 상대적으로 큰 변동이 확인된다. 정확한 원인 분석을 위해서는 추후 이에 대한 세부적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 국내 PM10 자료를 이용하여, 시공간적 변동성을 다각적으로 살펴보았다. 분석을 위해 지점 자료를 역거리가중법을 이용하여 공간보간하였다. 일평균 자료를

이용하여 전체 기간 및 연중 자료에 대한 주기성 분석을 수행하였으며, 전체 기간에 대해 확인된 주기성을 반영하여 월평균 자료를 통해 경향성 또한 알아보았다. 이때 연평균 자료의 추세도 살펴보았다. 이러한 분석을 통해, PM10의 농도는 과거에 비해 시공간적 변동이 줄어들고 있으며, 절대적인 값 또한 감소하는 추세를 보이고 있다는 점을 확인할 수 있었다. 본 연구의 세부 결과들은 다음과 같이 요약될 수 있다.

국내 평균자료와 이동평균, 그리고 calendar map을 통해 시각적으로 대략적인 추세와 주기적 성향을 확인할 수 있었다. 웨이블릿 분석을 통해 주기적 변동성에 대해 검토한 결과, 1년 정도의 시간을 주기로 반복되며, 이러한 반복은 매우 규칙적으로 나타나는 점을 확인할 수 있었다. 연중의 주기 성분을 살펴본 결과, 2000년대에는 봄철과 가을철에서만 달 이내의 강한 성분이 확인되나, 최근에는 대부분 봄철에서만 확인되며 한 달 이상의 주기 성분도 확인되었다. 월평균 및 연평균 자료에 대한 경향성을 분석한 결과, 통계적으로 유의하게 감소하는 추세를 나타냈다. 이러한 추세는 대략 1년에 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도인 것으로 확인되었다.

연평균 자료를 이용하여 격자 단위의 공간적 변화를 살펴본 결과, 북쪽으로 갈수록 PM10 농도가 상대적으로 크게 나타났다. 아울러 이러한 편차는 시간에 따라 둔화되며, 절대적인 값들 또한 상당히 감소된 것을 확인할 수 있었다. 추가로 각 격자들의 2001~2019년 연평균 자료의 평균 및 표준편차를 살펴본 결과, 수도권 부근의 PM10 농도가 상대적으로 높은 것으로 확인되었으며, 강원도 지역이나 공업단지가 밀집되어 있는 경상도의 동해안 부근도 비교적 고농도의 관측값을 확인할 수 있었다. 표준편차를 통해서도 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 즉, 비교적 수도권과 강원도, 즉 북쪽에 위치한 지역의 변동이 컸던 것으로 확인되며, 추가로

남서쪽에 위치한 전라남도 지역에서의 큰 변동 또한 확인할 수 있었다.

대기오염물질 배출에 대한 효율적인 제어와 관리, 그리고 합리적인 환경 정책을 수립하기 위해서는 실정에 부합하는 관리방안 및 대책을 제시하고 실행 할 필요가 있다. 본 연구를 통해 확인한 내용은 이러한 관리방안 및 대책 마련을 위한 중요한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, PM10보다 작은 입자인 PM2.5의 경우 시공간적인 변화가 다소 다르게 나타날 여지가 있으므로 해당 자료와 함께 다각적 분석이 수행될 필요가 있다.

감사의 글

이 성과는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021R1C1C2006215 및 NRF-2020R1G1A1013624).

References

- Bae, J., and Kim, Y. (2016). Causes of air pollution and effects of mitigation policy in Korea. *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 25, No. 4, pp. 545-564.
- Choi, C., and Kim, C. (2016). Path dependency and social amplification of risk in particulate matter air pollution management and its implications. *Journal of the Korean Regional Development Association*, Vol. 28, No. 5, pp. 89-108.
- Choi, H., and Choi, D.S. (2008). Concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 influenced by atmospheric circulation and atmospheric boundary layer in the Korean mountainous coast during a duststorm. *Atmospheric Research*, Vol. 89, No. 4, pp. 330-337.
- Choi, H., and Lee, M.S. (2012). Atmospheric boundary layer influenced upon hourly PM10, PM2.5, PM1 concentrations and their correlations at gangneung city before and after yellow dust transportation from gobi desert. *Journal of Climate Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 30-54.
- Choi, H., Choi, D.S., and Choi, S.M. (2010). Meteorological condition and atmospheric boundary layer influenced upon temporal concentrations of PM1, PM2.5 at a coastal city, Korea for yellow sand event from gobi desert. *Disaster Advances*, Vol. 3, No. 4, pp. 309-315.
- Choi, T.Y., Kang, D.I., and Cha, J.G. (2019). An analysis of the correlation between seoul's monthly particulate matter concentrations and surrounding land cover categories. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 28, No. 6, pp. 568-579.
- Choi, W.S. and Kim, J.J. (2018). Characteristics of ultrafine particles in urban areas observed worldwide and in Korea: Sources and emissions, spatial and temporal distributions, and health effects. *Atmosphere*, Vol. 28, No. 3, pp. 337-355.
- Hirsch, R.M., and Slack, J.R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 727-732.
- Hirsch, R.M., Slack, J.R., and Smith, R.A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 107-121.
- Hwang, I., Lee, T., Kim, T., and Bae, G. (2021). Characteristics of air pollutant emissions and distribution for particulate matter concentration of air pollution networks in Gyeongsangbuk-do. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 3, pp. 536-551.
- Hwang, Y., Lee, S., Do, H., Lee, Y., Son, T., Kwon, T., et al. (2009). The analysis of PM10 concentration and the evaluation of influence by meteorological factors in ambient air of Daegu area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 25, No. 5, pp. 459-471.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2013). *Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths*. No. 221, World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Jang, J., Lee, H.W., and Lee, S. (2012). Spatial and temporal features of PM10 evolution cycle in the Korean Peninsula. *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 21, No. 2, pp. 189-202.
- Jeon, B.I. (2003). Characteristics of heavy metallic elements of PM10 for yellow sand and non-yellow sand during springtime of 2002 at Busan. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 12, No. 2, pp. 99-108.
- Jeon, B.I. (2012). Meteorological characteristics of the wintertime high PM10 concentration episodes in Busan. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 21, No. 7, pp. 815-824.
- Jeong, J. (2018). The variation analysis on spatial distribution of PM10 and PM2.5 in Seoul. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 27, No. 6, pp. 717-726.
- Jeong, Y., Cho, S., Youn, Y., Kim, S., Kim, G., Kang, J., et al. (2021). Kriging of daily PM10 concentration from the air korea stations nationwide and the accuracy assessment. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 37, No. 3, pp. 379-394.

- Jin, S., Guo, J., Wheeler, S., Kan, L., and Che, S. (2014). Evaluation of impacts of trees on PM_{2.5} dispersion in urban streets. *Atmospheric Environment*, Vol. 99, pp. 277-287.
- Kang, S. (2020). Exploratory analysis for the concentration of PM₁₀ air particulates and the morphological pattern of greeninfra: The case of Gyeonggi-do, *GRI REVIEW*, Vol. 22, No. 4, pp. 25-40.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. London, UK: Charles Griffin.
- Kim, J.S., and Han, S.H. (2019). The effect of values of nature-based outdoor recreation on environmental policy support through particulate matter risk perception and ascription of responsibility: An application of VBN (Value-Belief-Norm). *International Journal of Tourism and Hospitality Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 5-20.
- Kim, J.Y., Kim, H., and Jung, K. (2018). Association between hourly differences of particulate matters concentration and emergency department visits in Seoul. *Public Health Affairs*, Vol. 2, No. 1, pp. 57-71.
- Kim, O.J., Kim, S.Y., and Kim, H. (2017). Association between long-term exposure to particulate matter air pollution and mortality in a South Korean National Cohort: Comparison across different exposure assessment approaches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 14, No. 10, 1103.
- Kim, S.Y. (2008). *Application of mann-kendall methods for the performance assessment of the total pollution load management of geum river*. Master's thesis, Hanbat National University, Daejeon, Korea.
- Lee, H.S., Kang, C.M., Kang, B.W., and Lee, S.K. (2005). A study on the PM_{2.5} source characteristics affecting the Seoul area using a chemical mass balance receptor model. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 21, No. 3, pp. 329-341.
- Lee, J., Lee, H., and Yoo, C. (2019). Selection of mother wavelet for bivariate wavelet analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 11, pp. 905-916.
- Lee, S.H., Seo, G.Y., Yoon, S.H., Yang, Y.C., Kim, S.J., Cho, Y.G., and Bae, S.J. (2018). Characteristics of PM₁₀ in Gwangju using factor analysis. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 27, No. 4, pp. 241-250.
- Lee, T., and Shin, J.Y. (2021). Latent negative precipitation for the delineation of a zero-precipitation area in spatial interpolations. *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-11.
- Lee, W.J., Hwang, M.K., and Kim, Y.K. (2014). Health vulnerability assessment for PM₁₀ in Busan. *Journal of Environmental Health Sciences*, Vol. 40, No. 5, pp. 355-366.
- Lee, Y.C., and Hills, P.R. (2003). Cool season pollution episodes in Hong Kong, 1996-2002. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 21, pp. 2927-2939.
- Lim, S.Y., and Cho, J.H. (2017). *Comparison of fine dust trends by country and region and policy implications*. Korea Institute for Industrial Economics and Trade., Sejong, Korea.
- Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, Vol. 13, No. 3, pp. 245-259.
- Nguyen, T., Yu, X., Zhang, Z., Liu, M., and Liu, X. (2015). Relationship between types of urban forest and PM_{2.5} capture at three growth stages of leaves. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 27, pp. 33-41.
- Olszowski, T. (2016). Changes in PM₁₀ concentration due to large-scale rainfall. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 9, No. 2, 160.
- Park, H., Byun, M., Kim, T., Kim, J.J., Ryu, J.S., Yang, M., and Choi, W. (2020). The washing effect of precipitation on PM₁₀ in the atmosphere and rainwater quality based on rainfall intensity. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 6-3, pp. 1669-1679.
- Park, S. (2021). Local-level analyses of atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Busan Metropolitan City based on a multi-scale approach. *The Geographical Journal of Korea*, Vol. 55, No. 3, pp. 321-334.
- Park, S., and Shin, H. (2017). Analysis of the factors influencing PM_{2.5} in Korea: Focusing on seasonal factors. *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 25, No. 1, pp. 227-248.
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, No. 324, pp. 1379-1389.
- Sung, S. (2020). Environmental planning countermeasures considering spatial distribution and potential factors of particulate matters concentration. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 89-96.
- Tian, G., Qiao, Z., and Xu, X. (2014). Characteristics of particulate matter (PM₁₀) and its relationship with meteorological factors during 2001-2012 in Beijing. *Environmental Pollution*, Vol. 192, pp. 266-274.

Torrence, C., and Compo, G.P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 1, pp. 61-78.

Weng, Q., and Yang, S. (2006). Urban air pollution patterns, land use, and thermal landscape: An examination of the linkage using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 117, No. 1, pp. 463-489.

Yeo, M.J., and Kim, Y.P. (2019). Trends of the PM10 concentrations and high PM10 concentration cases in Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 35, No. 2, pp. 249-264.

Yoon, E.J. (2020). Application of environmental planning considering the trend of PM10 in ambient air. *Journal of Environmental Impact Assess*, Vol. 29, No. 3, pp. 210-218.

Received	■	November 23, 2021
Revised	■	November 24, 2021
Accepted	■	January 11, 2022

