



논문

# 기류분석과 지형을 고려한 대기정체와 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 특성 연구

## A Study for Characteristics of Fine Particulate Matter and Atmospheric Stagnation Considering Elevation and Backward Trajectory

유재연\*, 권태혁, 강인숙, 이광수, 조창우, 김종신, 김현호, 장 욱, 박정제, 유택수

전북보건환경연구원 환경연구부

Jae-Youn Ryoo\*, Tae-Hyeok Kwon, In-Sook Kang, Kwang-Soo Lee, Chang-Wu Jo, Jong-Sin Kim, Hyun-Ho Kim, Wook Jang, Jeong-Jae Park, Taek-Soo Yoo

Environmental Research Department, Jeonbuk Institute of Health and Environment Research, Jeollabuk-do, Republic of Korea

접수일 2019년 9월 3일  
 수정일 2019년 10월 1일  
 채택일 2019년 10월 24일

Received 3 September 2019  
 Revised 1 October 2019  
 Accepted 24 October 2019

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)63-290-5241  
 E-mail : giantu@korea.kr

**Abstract** Air quality, meteorological parameters and terrain data were analyzed to understand the relationship among meteorological parameters, air stagnation and fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) at Samcheon-dong in Jeollabuk-do Korea from January to December, 2017. We'd like to suggest the region of high possibility to be stagnant in our country. During the entire periods, the high concentrations of PM<sub>2.5</sub> were found when the wind speed was lower than 1.8 m/s. Using HYSPLIT backward trajectories, the average wind speed of stagnant air mass that stayed for 24 hours on 1,000 m over Korean peninsula was 3.6 m/s and that of inflow air mass from the outside was 7.9 m/s but the wind speed on the ground were 1.4 m/s and 1.7 m/s respectively. The frequencies of the high concentration of PM<sub>2.5</sub> in stagnant air mass were much less than long-range transport but the concentration of PM<sub>2.5</sub> in stagnant was as high as that of long range transport. Furthermore, it is likely that atmospheric dispersion of two areas, which were both the height under 53 m and over 372 m, as well as over 1.8 m/s, would be very active due to the sea-land breeze and the strong wind on mountain area, respectively. Accordingly, it was considered that the areas of under 1.8 m/s were likely to be stagnant, especially the areas between the height of 53 m and 372 m had the potential to be stagnant severely.

**Key words:** Atmospheric stagnation, HYSPLIT, Backward trajectory, Terrain, Meteorological factors

### 1. 서론

미세먼지 (PM<sub>10</sub>)는 전국 평균이 2012년 (45 µg/m<sup>3</sup>)까지 지속적으로 감소하다가 2013년에 49 µg/m<sup>3</sup>으로 상승하였고 (NIER, 2018), 세계보건기구 (WHO) 산하 기관인 국제암연구소 (IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 미세먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질 (Group 1)로 지정하면서 전국적으로 많은 관심을 갖게 되었다.

이에 따라 환경부에서는 대기오염으로 인한 국민

건강 피해를 최소화하기 위해 대기오염 농도를 예보하고 있으며, 시시각각으로 변하는 대기질 상황을 전달하기 위해 전국 19개 권역을 대상으로 매일 4회 (5시, 11시, 17시, 23시) 대기오염농도 등급과 원인을 예측하여 에어코리아 (www.airkorea.or.kr)를 통해 국민들에게 전달하고 있다.

우리나라는 극동아시아에 위치하고 있어 편서풍을 타고 유입되는 국외 미세먼지의 영향을 많이 받아 미세먼지 관리에 어려움을 겪고 있다. 국립환경과학원에서 에어코리아를 통해 제공하는 최종확정자료를 이

**Table 1.** The frequency of bad days in 2017.

	National	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju
Bad days	60	88	72	93	50	98	20	48	34	36
Rank	-	3	4	2	5	1	9	6	8	7

용하여 광역자치단체별 나쁨일수를 분석해보면, 국내에서 생산되는 미세먼지 관리에 초점을 맞춘 정부의 강력한 저감 대책에도 불구하고, 2019년 현재 나쁨기준( $PM_{2.5} > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )으로 2017년 초미세먼지 고농도 발생사례를 분석해보면 전국이 60일이었다. 광역자치단체의 경우 전북이 98일로 가장 많았으며, 그 다음으로는 충북이 93일, 경기 88일 순이었다(표 1).

에어코리아의 대기정보 예보를 보면 대기오염농도 등급과 함께 원인분석이 제공되는데, 원인 분석에 포함된 “국외”, “국내·외”, “국내”, “정체” 그리고 “축적” 키워드의 빈도를 분석하였고, 이러한 키워드들은 대기정보 예보시 교차하여 사용되고 있다. 2017년 전북의 초미세먼지 나쁨( $PM_{2.5} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 예보는 총 32일이었으며, 이러한 키워드 빈도를 분석해 보면 “국외”가 16일(50.0%), “국내·외”가 8일(25.0%), “국내”가 2일(6.3%)로 나타났으며, “정체”와 “축적”은 21일(65.6%)로 예보하였다. 이는 국외 미세먼지 유입으로 고농도 미세먼지가 발생할 수 있지만, 국내에서 발생한 또는 국외에서 유입된 미세먼지가 대기 정체로 축적되면서 고농도가 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

그러나 대기 정체는 고기압 조건에서 발생(Park and Yu, 2018; Ko *et al.*, 2016)된 정도로만 설명되고 있으며, 더 이상의 설명을 찾기는 어려웠다. 대기 정체는 풍속이 약해 대기확산이 원활하지 못한 상태를 말하므로 풍속과 지형 등의 자료를 활용하여 제안할 필요가 있다.

본 연구는 대기 정체의 조건을 제안하고, 제안된 대기정체와 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )와의 관계를 파악하기 위한 목적으로 수행하였다. 이를 위해 기상요소가 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 농도에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고, HYSPLIT 모델에 의한 상층기상을 국내 정체기류와 국외 유입기류로 분류하여 초미세먼지의 특

성을 파악하였으며, 풍속과 고도를 이용하여 대기가 정체될 가능성이 많은 지역을 제안하였다.

## 2. 내용 및 방법

전라북도의 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )와 대기정체에 대한 관계를 파악하기 위하여, 대기질 자료, 기상요소와 지형자료(SRTM, Shuttle Radar Topography Mission)를 이용하였다.

초미세먼지 고농도( $PM_{2.5} > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 발생과 기상요소와의 관계를 보기 위하여, 국립환경과학원에서 에어코리아를 통해 제공하는 최종확정자료를 이용하여 2011년부터 2017년까지 전라북도 내 도시대기측정소 16개소에서 측정된 초미세먼지 농도와 온도, 습도, 풍속 시간평균 자료를 이용하였다.

상층기상과 지상기상과의 관계와 국외 유입기류와 국내 정체기류를 분류하기 위하여 미국해양대기관리처(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델(Stein *et al.*, 2015)을 이용하였다. 기상자료는 NOAA GDAS(Global Data Assimilation System) 0.5 자료를 활용하였으며, 모델링 기간은 2017년 1월 1일부터 12월 31일까지 3시간 간격으로, 전주시 삼천동 도시대기측정소에서 1,000 m 상층의 등압면을 이용하여 72시간 동안 역기류를 분석하였으며, R 프로그램의 opentraj 패키지(Thalles, 2014)를 이용하여, 기류의 위치와 체류시간에 따른 대기정체를 제안하였다. 전주시 삼천동 도시대기측정소는 국가에서 운영하는 종합대기측정소이며, 지역 대표성이 높은 지점으로 대기질의 연도별 변화추이 감시와 다양한 대기오염물질의 집중 측정

으로 종합적 대기질 현황을 파악하는 종합대기측정소이다(NIER, 2016).

지형특성과 기상요소와의 관계를 통해 대기가 정체되는 지역을 파악하기 위하여, 미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 SRTM (90 m × 90 m)의 지형자료를 이용하였으며, 지형특성 분석은 R 프로그램의 raster 패키지(Robert, 2017)를 활용하였고, 기상자료개방포털(<http://data.kma.go.kr>)에서 제공하는 전국 종관기상관측장비(ASOS, Automated Synoptic Observing System)와 방재기상관측장비(AWS, Automate Weather System) 총 588개소의 고도와 연평균 풍속 자료를 이용하여, 고도와 풍속의 관계를 회귀분석으로 해석하여 대기정체지역을 제안하였다.

대기정체지역의 등풍속선을 그리기 위하여 R 프로그램 kriging 패키지(Omar, 2014)의 Ordinary kriging algorithm을 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 초미세먼지 고농도 발생과 기상요소와의 관계

2017년 전주시 삼천동 도시대기측정소의 대기질 시간 평균자료와 전주 기상대의 온도, 습도, 풍속, 강수량, 일사량, 일조시간 시간자료를 융합하여 Pearson 상관관계를 파악하여 그림 1에 나타내었다. 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)는 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 강한 양의 상관(0.7)관계를 보였으며, NO<sub>2</sub>와 CO와도 양의 상관(0.55, 0.31)으로 다른 오염물질과의 상관관계를 확인할 수 있었다. 초미세먼지와 기상요소인 온도와는 음의 상관(-0.54)을 보여 온도가 낮은 시기에 초미세먼지 농도가 높게 나타나는 경향이 있지만, 다른 기상요소와의 상관은 -0.18~-0.03으로 유의한 상관은 보이지 않았다.

PM<sub>2.5</sub>는 온도를 제외한 나머지 기상요소와의 유의한 상관관계를 파악할 수 없어, 2011년부터 2017년까지 전라북도에 있는 도시대기측정소 16개소의 PM<sub>2.5</sub>

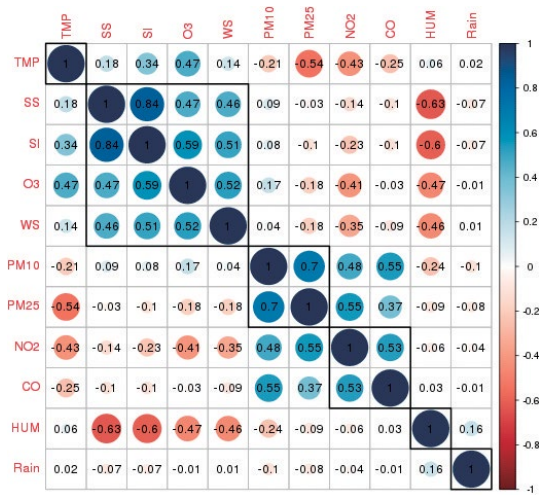


Fig. 1. The correlation between air quality and meteorological element for the high PM<sub>2.5</sub>.

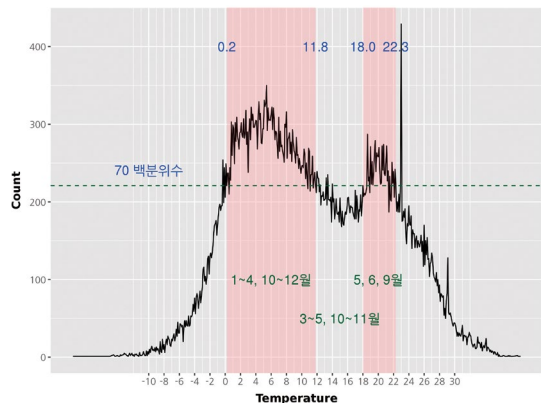


Fig. 2. The frequencies of high PM<sub>2.5</sub> depending on temperature.

와 온도, 습도, 풍속의 자료를 활용하여, 초미세먼지 고농도(PM<sub>2.5</sub> > 35 μg/m<sup>3</sup>)가 빈번하게 발생(70백분위수)하는 범위를 파악하였다. 그 범위는 기상요소에 대해 고농도 초미세먼지 발생빈도가 많은 순서대로 기상요소를 정렬했을 때, 충분히 빈도가 높은 기상요소의 범위를 파악하여 이후의 분석에 필요한 데이터를 추출하고 확보하기 위하여 70백분위수로 정하였다.

그림 2는 온도와 PM<sub>2.5</sub>의 고농도가 발생하는 빈도를 나타내었다. PM<sub>2.5</sub> 고농도사례가 빈번하게 발생하

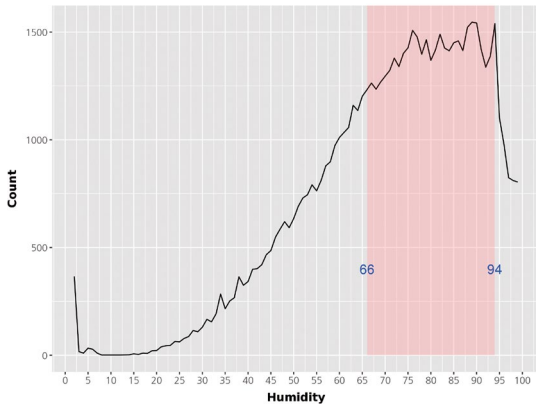


Fig. 3. The frequencies of high PM<sub>2.5</sub> depending on humidity.

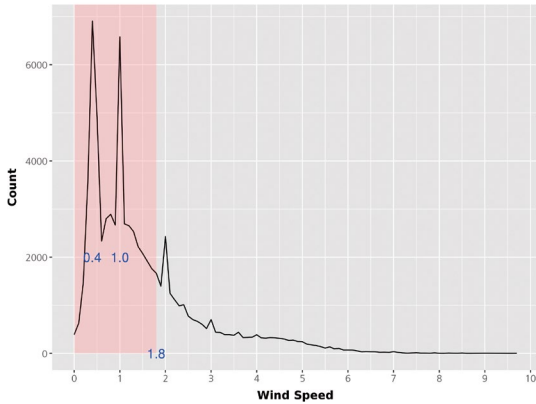


Fig. 4. The frequencies of high PM<sub>2.5</sub> depending on wind speed.

는 온도의 범위는 0.2~11.8°C와 18.0~22.3°C이었다. 0.2~11.8°C는 주로 늦가을(10월)부터 초봄(4월)까지의 기온이었으며, 18.0~22.3°C는 주로 5월, 6월, 9월의 기온이었다.

그림 3과 그림 4는 습도와 풍속에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 고농도가 발생하는 빈도를 나타내었다. PM<sub>2.5</sub> 고농도 사례가 빈번하게 발생하는 습도의 범위는 66~94%이었으며, 풍속 1.8 m/s 이하에서 발생하는 특성을 보였다.

### 3.2 상층과 지상의 풍향, 풍속

지상 기상요소 중 기온, 습도, 풍속과 초미세먼지 농

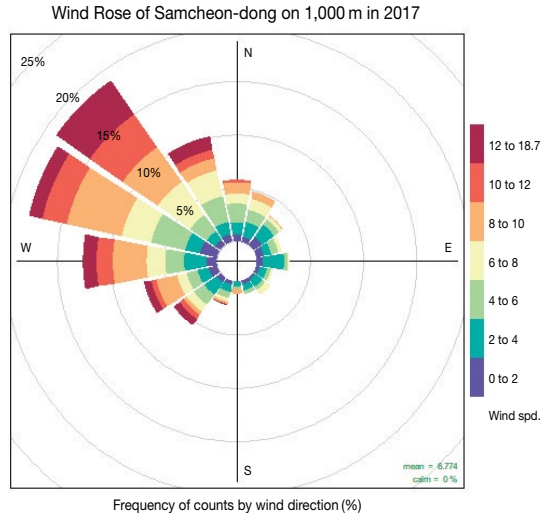


Fig. 5. Wind rose of Samcheon-dong on 1,000 m above ground in 2017.

도와의 관계는 그림 1과 같이 유의한 상관을 보이지 않았으며, 그림 2에서 4와 같이 고농도가 빈번하게 발생하는 특정한 범위를 설명할 수 있는 정도였다.

지상기상은 지표면 마찰에 의한 영향 등 여러 가지 변동요인을 가지고 있지만, 초미세먼지는 상층기류를 통해 국외에서 유입될 수도 있어, 상층기상과 지상기상, 초미세먼지와의 관계를 함께 파악하는 것이 중요하다고 생각된다.

지상 1,000 m의 풍향은 HYSPLIT 모델 결과를 이용하여 기류가 72시간 동안 이동해오면서 매시간 마다의 풍향을 계산하고 가장 높은 빈도의 풍향을 그 기류의 풍향으로 설정하였다. 이렇게 설정된 기류의 풍향 빈도가 50% (37시간) 이하이면 풍향을 설정하지 않았다. 풍속은 매시간의 위경도와 고도를 고려하여 매시간과 그 이전시간에서 두 기류의 거리를 계산하고, 이동시간(1시간)으로 나누어 풍속을 계산하였다.

그림 5는 HYSPLIT 결과 2017년 전주시 삼천동 도시대기측정소 지상 1,000 m로 유입되는 기류의 풍향과 풍속과의 관계를 표현하였다. 가장 빈도가 높은 풍향은 북서풍이었으며 남서부터 북쪽까지의 풍향이 대부분(77.8%)을 차지하고 있다. 또한, 6 m/s 이상의 풍

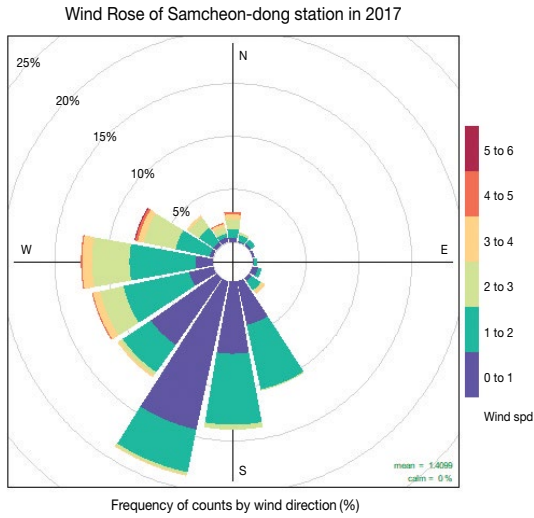


Fig. 6. Wind rose of Samcheon-dong on site in 2017.

속이 높은 빈도를 보이고 있다.

그림 6은 전주시 삼천동 도시대기측정소의 지상 풍향과 풍속과의 관계를 나타내고 있다. 풍향은 남남동부터 서북서까지의 풍향이 86.6%로 대부분을 차지하고 있으며, 풍속은 남풍계열이 2 m/s 이하이며, 서풍계열로 갈수록 풍속이 빨라지고 있다.

또한, 그림 5와 그림 6을 같이 비교하면, 지상 풍향(그림 6)이 상층 풍향(그림 5)에 비해 반시계방향으로 각 천이가 발생하고 있으며, 풍속도 감소하고 있다. 이는 지표면의 마찰에 의한 에크만 나선(Ekman spiral) 효과(Lee, 2000)에 의한 것으로 설명할 수 있다.

표 2는 2017년 전주시 삼천동 도시대기측정소 지상 1,000 m로 유입되는 기류의 풍향별 빈도와 지상 PM<sub>2.5</sub> 평균농도를 나타내었다. 그림 7은 1,000 m 상층의 풍

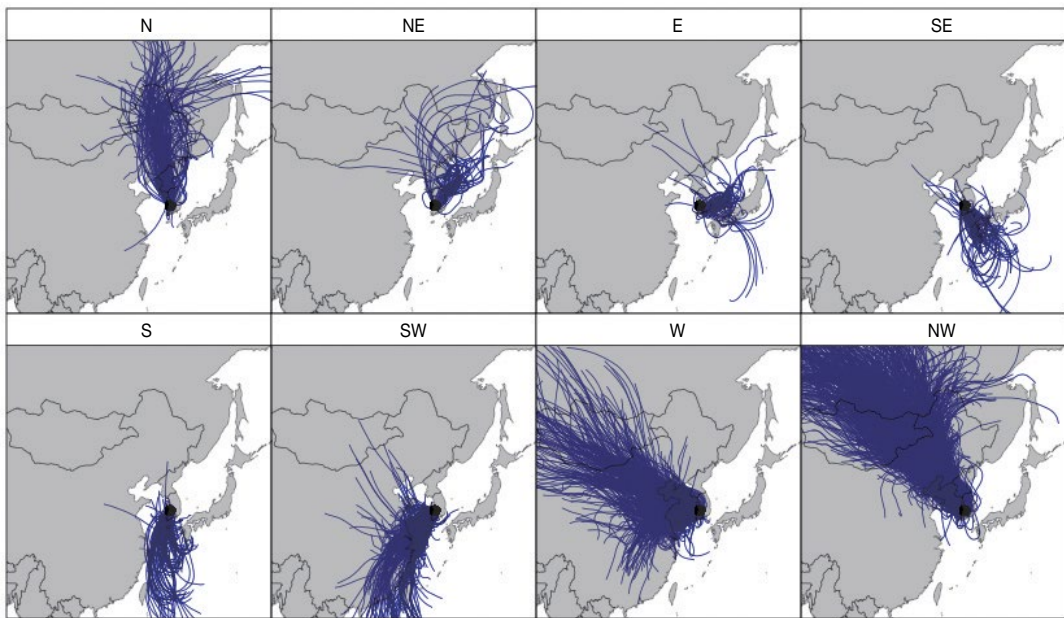
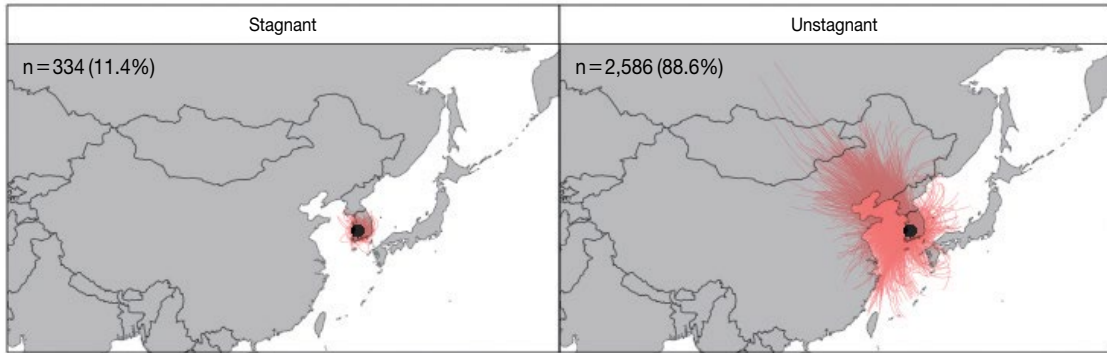


Fig. 7. 72-hour HYSPLIT back trajectories centered on Samcheon-dong for 2017, shown separately for wind direction.

Table 2. The frequencies of wind direction on 1,000 m above ground at Samcheon-dong station and the average concentration of PM<sub>2.5</sub> on site in 2017.

Wind direction	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Unallocated
Frequency (%)	172 (5.9)	54 (1.8)	56 (1.9)	61 (2.1)	91 (3.1)	255 (8.7)	610 (20.9)	941 (32.2)	680 (23.3)
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	31.4	23.1	15.5	19	14.5	21.3	35.6	33.7	26.3



**Fig. 8.** 24-hour HYSPLIT back trajectories centered on Samcheon-dong for 2017, shown separately for being stagnated on the Korean peninsula for 24 hours or not.

**Table 3.** The concentration of  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) on site and wind speed (m/s) on site and 1,000 m above the ground by stagnation.

	Stagnant			Unstagnant		
	Min.	Avg $\pm$ SD	Max.	Min.	Avg $\pm$ SD	Max.
Wind speed on 1,000 m above the ground	0.3	3.6 $\pm$ 2.23	13.1	0.2	7.9 $\pm$ 4.31	25.6
Wind speed on site	0.2	1.4 $\pm$ 0.65	4.4	0.3	1.7 $\pm$ 0.83	6.1
$PM_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) on site	36	44.7 $\pm$ 10.44	76	36	48.3 $\pm$ 11.72	110

향별 기류를 나타내었다.

표 2와 그림 7의 1,000 m 상층의 풍향별 기류를 보면, 북서풍이 32.2%로 가장 높은 빈도를 보이며, 그다음으로는 서풍(20.9%), 남서풍(8.7%), 북풍(5.9%) 순이었으며, 풍향을 설정하지 못한 경우도 23.3%를 차지하고 있다. 상층 풍향별 지상에서의  $PM_{2.5}$  평균농도를 보면, 서풍이  $35.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보이며, 그다음으로는 북서풍이  $33.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 북풍이  $31.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 풍향을 설정하지 못한 경우  $26.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  순이었다. 북동풍( $23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 남서풍( $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 큰 농도 차이를 보이지는 않지만, 남서풍의 빈도수가 255회로 북동풍 54회보다 훨씬 높은 빈도로 고농도 발생 사례도 많은 것으로 보인다. 따라서 상층 풍향에 따른  $PM_{2.5}$  평균농도는 남서풍에서 북풍까지의 풍향에서 상대적으로 높은 농도를 보인다.

### 3.3 국내 정체기류와 국외 유입기류 분류

2017년 3시간 간격으로 전주시 삼천동 도시대기측정소 지상 1,000 m로 유입되는 기류를 이용하여 국

외에서 유입되는 기류와 국내 정체기류를 구분하였다. 국내 정체기류는 24시간 동안 한반도 상공(위도  $34.4^\circ \sim 37.8^\circ$ , 경도  $126.0^\circ \sim 129.7^\circ$ )에 머무른 기류로 정의하였다. 24시간을 설정한 이유는 대한민국을 정사각형으로 환산하여 한 변을 약 300 km로 가정하였고, 1.8 m/s 이하의 풍속( $PM_{2.5}$  고농도사례의 70백분위수)으로 이 정사각형의 중심점까지 이동하는 시간이 대략 24시간이 소요된다고 가정하였다.

그림 8은 24시간 기류의 유입경로를 표현하였다. 24시간 동안 한반도 상공에 머무른 국내 정체기류(stagnant)는 334회로 11.4%를 차지하였으며, 국외에서 유입된 기류(unstagnant)는 2,586회로 88.6%를 차지하고 있다. HYSPLIT 모델에 의한 1,000 m 상공의 풍속을 비교한 표 3과 그림 9를 보면, 국내 정체기류의 상층 평균 풍속은 3.6 m/s, 국외 유입기류의 상층 평균 풍속이 7.9 m/s로 차이가 뚜렷하게 나타났다. 지상의 풍속을 비교한 표 3과 그림 10을 보면 국내 정체기류의 지상 평균 풍속 1.4 m/s와 국외 유입기류의 지상 평균 풍속이 1.7 m/s는 통계적으로 유의한 차이가 있지

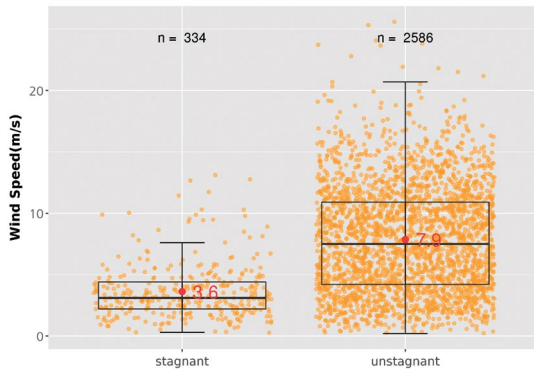


Fig. 9. The average wind speed depending on stagnation on 1,000 m above the ground.

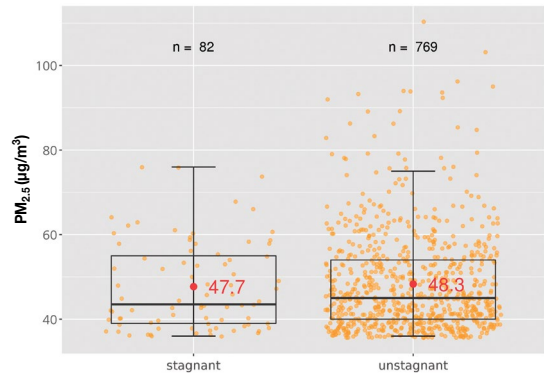


Fig. 11. The average of PM<sub>2.5</sub> high concentration on site depending on domestic and abroad air parcels.

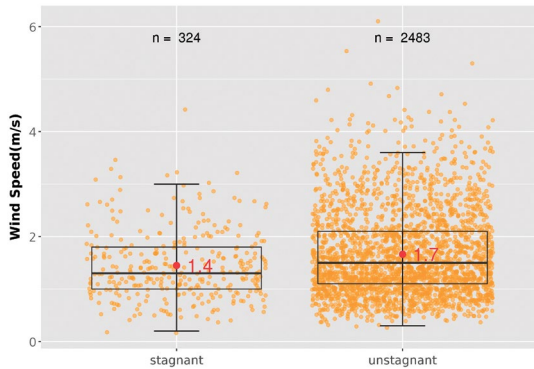


Fig. 10. The average wind speed depending on stagnation on site.

만, 그 풍속의 차이가 크지 않아 지상에서 풍속을 체감하였을 때 국외 유입기류인지, 국내 정체기류인지 구분하기가 쉽지 않을 것이다. 한편 그림 9와 10의 데이터 수가 약간 차이가 나는 이유는 그림 9의 데이터는 HYSPLIT 모델에 의해 계산된 데이터이며, 그림 10은 전주시 삼천동 도시대기측정소에서 측정된 데이터로 결측치가 있어 데이터 수의 차이가 발생되었다.

표 3과 그림 11에는 국내 정체기류와 국외 유입기류의 고농도 발생시 지상의 PM<sub>2.5</sub> 평균농도를 나타내었다. 국내 정체기류의 2017년 고농도 발생시 지상의 PM<sub>2.5</sub> 평균농도는 47.7 µg/m<sup>3</sup>이었으며, 국외 유입기류의 고농도 발생시 지상의 PM<sub>2.5</sub> 평균농도는 48.3 µg/m<sup>3</sup>으로 통계적으로 유의한 차이가 없는 것 (p-value

= 0.648)으로 나타났다.

비록 국내 정체기류의 고농도 발생사례 (n = 82)가 국외 유입기류의 고농도 발생사례 (n = 769)보다 훨씬 적더라도, 국내 정체기류의 고농도 발생 농도는 국외 유입기류 수준으로 높은 것을 알 수 있었다.

### 3.4 지형특성과 기상요소와의 관계

대기의 흐름은 온도와 압력 차이뿐만 아니라 지형적인 특성에 의해서도 영향을 받으므로 지형특성과 기상요소와의 관계를 통해 대기가 정체되는 지역을 파악하였다.

R 프로그램의 raster 패키지를 활용하여 시·도별로 파악한 지형특성은 고도, 거칠기 (roughness), 경사도 (slope), 물의 흐름방향 (flow direction of water), aspect, TRI (terrain ruggedness index), TPI (topographic position index)이었으나, 고도(그림 13)를 제외한 나머지 지형적 특성들의 분포(그림 12)를 보면 시·도별로 유의한 차이를 보이지 않았다.

그림 13과 그림 14는 전국의 고도 분포를 나타낸 것으로 강원도의 평균 고도가 525 m로 가장 높았으며, 그 다음으로 경상북도 298 m, 충청북도 288 m, 전라북도 255 m, 경상남도 254 m 순이었으며, 가장 낮은 평균 고도는 충청남도 106 m, 전라남도 146 m, 경기도 156 m 순이었다. 그림 12와 그림 13의 n 값은 각 광역 자치단체별 지형자료 (STRM) 격자점 (90 m × 90 m)

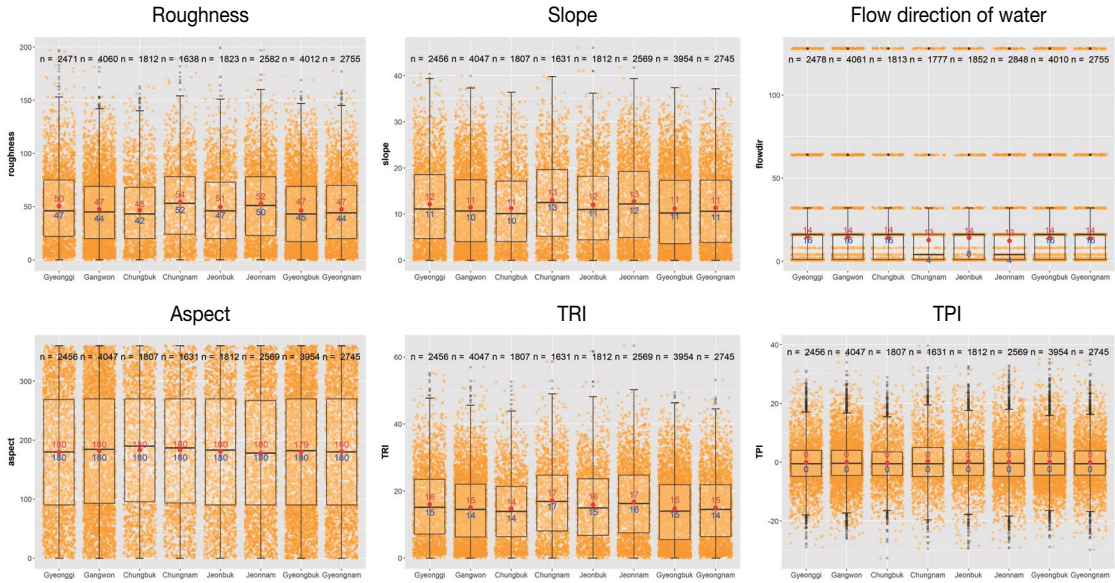


Fig. 12. The topographical characteristics of local governments.

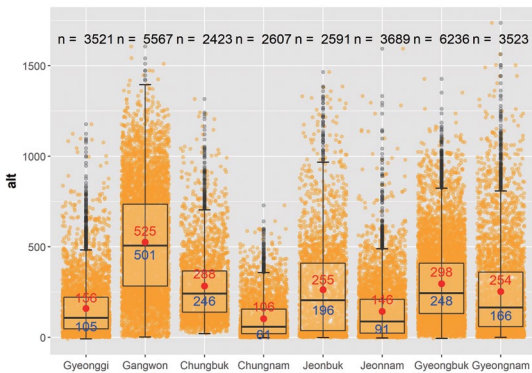


Fig. 13. The distribution of altitude by local governments.

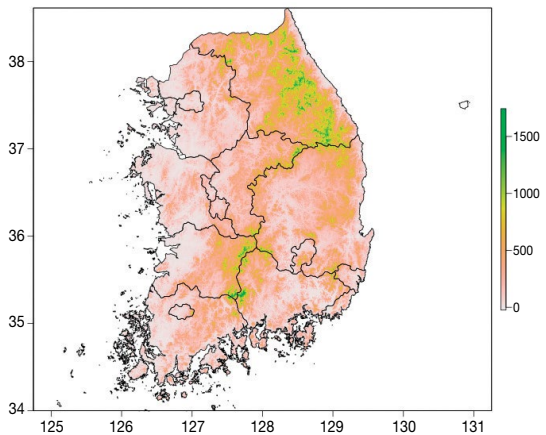


Fig. 14. The distribution of elevation (m) on South Korea.

의 1/500을 비복원 임의 추출한 개수로 각 광역자치단체의 면적에 따라 고도를 측정된 격자점의 개수가 다르다.

그림 15에 전국 588개소 기상관측소의 고도와 풍속과의 관계를 나타내었다. 기상관측소의 고도와 풍속과의 관계는 국자형태의 추세를 보이고 있다. 고도가 100 m 정도까지는 풍속의 범위가 최소 0.5 m/s에서 최대 5.6 m/s까지로 큰 편차를 보이지만, 고도가 높아짐에 따라 풍속이 감소하는 경향이 있다. 고도가 약 250

m 이상일 때에는 고도가 높아짐에 따라 풍속도 강해지는 경향을 보인다. 이러한 특성에 따라 고도자료를 저지대(100 m 이하)와 고지대(250 m 이상)로 구분하여 각각 회귀분석을 통해 기울기와 절편을 구하였고, 고농도 발생사례가 빈번하게 발생하는 풍속 70백분위수인 1.8 m/s(그림 4)와 만나는 고도를 구하였다. 저지대와 1.8 m/s의 풍속과 만나는 고도는 53 m이었으



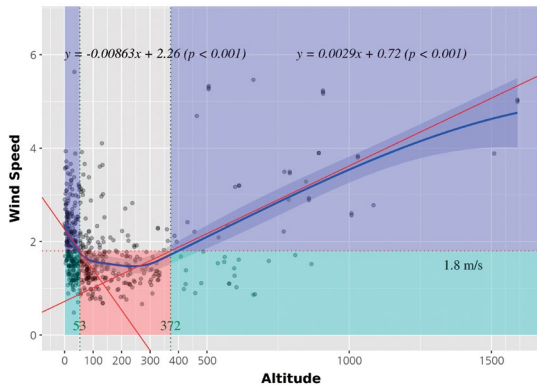


Fig. 15. Wind speed and altitude of weather stations.

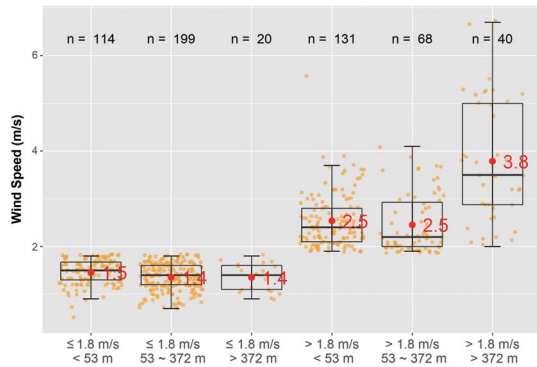


Fig. 16. The average of wind speed by stagnation classes in 2017.

며, 고지대와 1.8 m/s와 만나는 고도는 372 m이었다. 즉, 고도 53 m 이하이고 풍속이 1.8 m/s 이상인 기상관측소(고도 53 m 이하 기상관측소 중 53.5%)가 위치한 지역은 바닷가에 인접하여 해륙풍의 영향으로 대기 확산이 활발한 지역으로 판단되며, 고도 372 m 이상이고 풍속이 1.8 m/s 이상인 기상관측소(고도 372 m 이상 기상관측소 중 66.7%)가 위치한 지역은 산악지형의 빠른 풍속의 영향을 받아 대기확산이 활발한 지역이라 판단된다.

이에 따라 평균 풍속 1.8 m/s 이하 지역은 대기가 정체될 가능성이 많은 지역이며, 특히 53~372 m 고도에 있는 대부분의 기상관측소(74.5%)는 대기정체(1.8

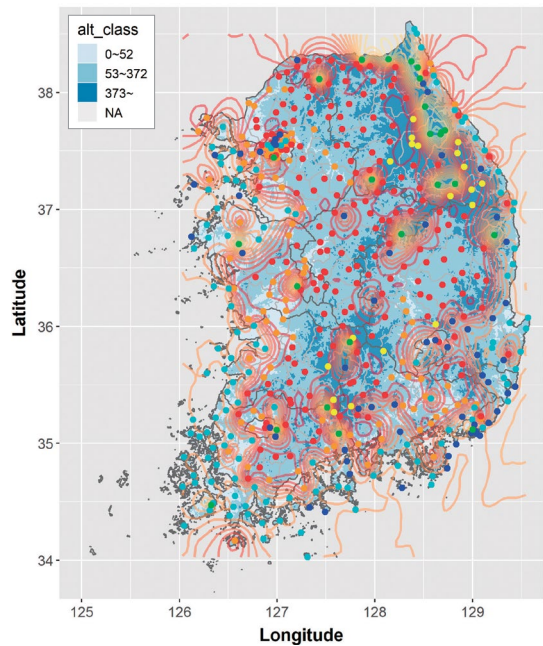


Fig. 17. The Stagnation classes on South Korea. The areas of densely contour lines mean the atmospheric dispersion would be active and the empty areas were likely to be stagnant severely. Points are the weather stations (orange points: wind speed  $\leq 1.8$  m/s, altitude  $< 53$  m, red points:  $\leq 1.8$  m/s, 53~372 m, yellow point:  $\leq 1.8$  m/s,  $> 372$  m, cyan point:  $> 1.8$  m/s,  $< 53$  m, blue points :  $> 1.8$  m/s, 53~372 m, green points:  $> 1.8$  m/s,  $> 372$  m).

m/s 이하)지역이었다. 이러한 구분으로 평균 풍속을 구하여 그림 16에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 평균 풍속 1.8 m/s 이하인 좌측 3개의 범주는 대기정체가 빈번한 지역으로 사료된다.

그림 17에는 전국 기상관측소의 위치와 그림 15, 그림 16에서 구분한 대기정체지역을 표현하였다. 고도 53 m 이하이고 풍속 1.8 m/s 이상으로 해풍의 영향을 많이 받는 지역(cyan points)을 보면 모두 해안가에 인접해 있으며, 고도 372 m 이상이고 풍속 1.8 m/s 이상으로 산악지형의 빠른 풍속의 영향을 받는 지역(green points)은 강원도 태백산맥, 충청북도와 경상북도의 경계, 전라북도의 동부권으로 이어지는 백두대간에 위치하고 있다.

풍속이 1.8 m/s 이하이며 고도가 372 m 이하(orange

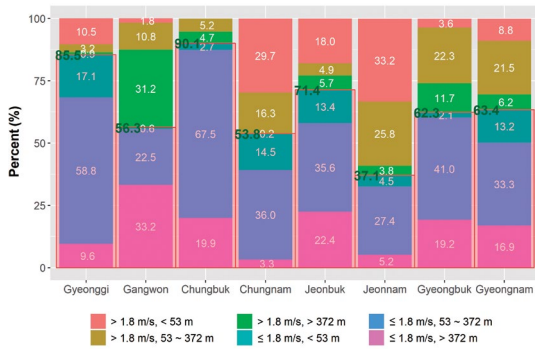


Fig. 18. The ratio of stagnation classes on local governments.

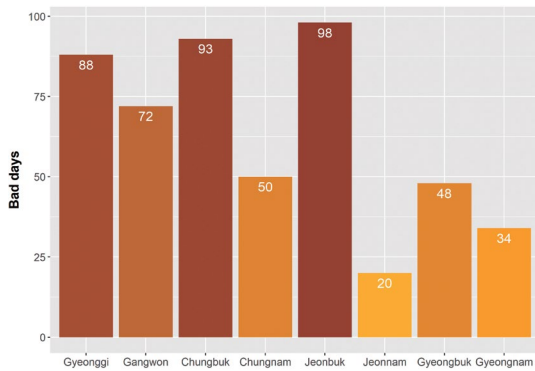


Fig. 19. Bad days (> 35 µg/m<sup>3</sup>) on daily mean of PM<sub>2.5</sub> in 2017.

and red points)로 대기가 정체될 가능성이 높은 지역은 해안가와 백두대간의 산악지대를 제외한 지역에 분포되어 있다.

평균 풍속으로 kriging 기법을 활용하여 한반도 전역의 등풍속선도 그림 17에 표시하였다. 백두대간과 해안지역은 풍속이 빨라 대기확산이 원활할 것으로 나타났지만, 경기 동부, 강원 영서, 충북 전역, 경북 중부, 전북 중부지역은 풍속이 느려 대기가 정체될 가능성이 높아 대기오염물질이 축적되어 고농도사례가 발생될 가능성이 높을 것으로 사료된다.

그림 18에는 고도와 풍속에 따른 대기정체지역 구분을 전국 광역도별 면적비로 나타내었다. 대기정체(1.8 m/s 이하)지역은 충청북도가 90.1%로 가장 많았고, 그다음으로 경기도가 85.5%, 전라북도가 71.4% 순

이었다.

고도와 풍속으로 대기정체지역을 구분한 결과를 검증하기 위하여 그림 19에 2017년 PM<sub>2.5</sub>의 일평균 농도로 나쁨(> 35 µg/m<sup>3</sup>) 일수를 나타냈다. 나쁨 일수는 전라북도가 98일, 충청북도 93일, 경기도 88일 순으로 나타났다. 대기정체지역의 면적 순위와 초미세먼지 나쁨 일수의 순위가 다른 이유는 각 광역도의 초미세먼지 나쁨 일수 산정할 때 이용되는 도시대기측정소의 위치와 개수수에 차이가 있기 때문으로 판단된다. 이에 따라 전북은 초미세먼지 나쁨 일수가 98일로 1위, 대기정체지역 면적비(그림 18)는 3위로 두 순위가 다르지만, 3개도(경기도, 충청북도, 전라북도)는 다른 도에 비해 대기정체지역이 많으며, 나쁨 일수도 많음을 알 수 있었으며, 향후 대기정체로 인한 초미세먼지 나쁨 일수가 많을 것으로 사료된다. 이에 따라, 고도와 풍속으로 구분한 대기정체지역을 간접적으로 검증하였다고 판단된다.

그러므로 국외의 초미세먼지 유입은 국가적 차원에서 다뤄야 할 외교적 문제이지만, 국내에서 발생하는 오염물질이 대기정체로 축적이 될 경우, 특히 경기도, 충청북도, 전라북도 3개도는 대기정체 면적과 가능성이 타 도보다 월등히 높으므로 오염물질이 축적되면서, 초미세먼지 2차 생성 가능성이 매우 높다. 따라서 국내에서 생성되는 오염물질의 저감을 위한 지속적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

2017년 전주시 삼천동 도시대기측정소 대기질 자료, 전국 기상자료와 지형자료 등을 이용하여, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)와 기상요소, 대기 정체와의 관계를 파악하고, 대기가 정체될 가능성이 높은 지역을 제안하고자 하였다.

1. 전라북도 도시대기측정소의 PM<sub>2.5</sub> 고농도사례의 대부분은 풍속 1.8 m/s 이하에서 발생하는 특성을 보이고 있다. 지상 풍향이 상층 풍향에 비해 반시계방향으로 각 천이가 발생하고 있으며, 풍속도 감소하고 있

다. 이는 지표면의 마찰에 의한 에크만 나선 효과를 설명하고 있다. 상층 풍향에 따른 PM<sub>2.5</sub> 평균농도는 남서풍에서 북풍까지의 풍향에서 상대적으로 높은 농도를 보이고 있다.

2. 전주시 삼천동을 기준으로 24시간 동안 한반도 상공에 머무른 국내 정체기류(stagnant)는 11.4%로 상층 평균 풍속 3.6 m/s이었으며, 국외에서 유입된 기류(unstagnant)는 88.6%로 상층 평균 풍속이 7.9 m/s로 뚜렷한 차이가 있었지만, 지상 풍속은 각각 1.4 m/s와 1.7 m/s로 통계적으로 유의한 차이가 있지만 크지 않아 지상에서 풍속으로 구분하기는 쉽지 않을 것이다.

3. 2017년 전주시 삼천동에서 고농도 발생시 국내 정체기류의 PM<sub>2.5</sub> 평균농도는 47.7 µg/m<sup>3</sup>이었으며, 국외 유입기류의 PM<sub>2.5</sub> 평균농도는 48.3 µg/m<sup>3</sup>으로 통계적으로 유의한 차이가 없는 것(p-value = 0.648)으로 나타났다. 또한, 국내 정체기류 고농도 발생사례(n = 82)는 국외 유입기류의 고농도 발생사례(n = 769)보다 훨씬 적었지만, 고농도 발생 농도는 국외 유입기류 수준으로 높은 것을 알 수 있었다.

4. 우리나라의 지형특성과 풍속과의 관계를 보면 고도를 제외한 나머지 지형적 특성은 뚜렷한 상관관을 보이지 않고 있지만, 해발고도 53 m 이하이고 풍속이 1.8 m/s 이상인 지역은 바닷가에 인접하여 해륙풍의 영향으로 대기확산이 활발한 지역으로 판단되며, 해발고도 372 m 이상이고 풍속이 1.8 m/s 이상인 지역은 산악지형의 빠른 풍속의 영향을 받아 대기확산이 활발한 지역이라 판단된다. 이에 따라 1.8 m/s 이하 지역은 대기가 정체될 가능성이 많은 지역이며, 특히 해발고도에 53~372 m 지역은 대기정체가 더 심할 것으로 판단된다.

5. 고도와 풍속으로 대기정체지역을 구분한 결과 백두대간과 해안지역은 풍속이 빨라 대기확산이 원활한 것으로 나타났지만, 경기 동부, 강원 영서, 충북 전역, 경북 중부, 전북 중부지역은 풍속이 느려 대기가 정체될 가능성이 높아 대기오염물질이 축적되어 고농도사례가 발생될 가능성이 높을 것으로 사료된다.

6. 대기정체지역은 충청북도가 90.1%로 가장 많았

고, 경기도가 85.5%, 전라북도가 71.4% 순이었으며, 초미세먼지 나쁨 일수는 전라북도(98일), 충청북도(93일), 경기도(88일) 순으로 많았다.

종합적으로 판단하면, 국외의 초미세먼지 유입은 국가적 차원에서 다루어야 할 외교적 문제이지만, 국내에서 발생하는 오염물질이 대기정체로 축적이 될 경우, 특히 경기도, 충청북도, 전라북도 3개도는 대기정체 면적과 가능성이 타 도보다 월등히 높으므로 오염물질이 축적되면서, 초미세먼지 2차 생성 가능성이 매우 높다. 따라서 국내에서 생성되는 오염물질의 저감을 위한 지속적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 국립환경과학원의 시도보건환경연구원 국고보조사업(NIER-2018-01-03-019)으로 일환으로 일부 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Ko, H.-J., Song, J., Cha, J., Kim, J., Ryoo, S., Kang, C. (2016) Chemical composition characteristics of atmospheric aerosols in relation to haze, Asian Dust and Mixed Haze-Asian Dust episodes at Gosan Site in 2013, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(3), 289-304, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.3.289>.
- Lee, C. (2000) *Air Pollution Meteorology*, Donghwa Technology Publishing Co., p. 75.
- National Institute of Environmental research (NIER) (2016) *Operation Plan for Air Pollution Monitoring Network(2016-2020)*, p. 53.
- National Institute of Environmental research (NIER) (2018) *Annual Report of Air Quality in Korea 2017*, p. 18.
- Omar, E.O. (2014) kriging: Ordinary Kriging. R package version 1.1. <http://CRAN.R-project.org/package=kriging>.
- Park, S., Yu, G. (2018) Effect of air stagnation conditions on mass size distributions of water-soluble aerosol particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 418-429, (in Korean with English ab-

stract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.418>.

- Robert, J.H. (2017) raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.6-7. <http://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, Bulletin of the American Meteorological Society, 96, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
- Thalles Santos silva (2014) opentraj: Tools for Creating and Analysing Air Trajectory Data. R package version 1.0. <http://CRAN.R-project.org/package=opentraj>.
- Yu, G.-H., Cho, S., Bae, M., Lee, K., Park, S. (2015) Investigation of PM<sub>2.5</sub> pollution episodes in Gwangju, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 21(3), 269-286, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.21.3.269>.

## Authors Information

유재연 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구사)  
 권태혁 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구관)  
 강인숙 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구사)  
 이광수 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구사)  
 조창우 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구사)  
 김종신 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구사)  
 김현호 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구사)  
 장 옥 (전북보건환경연구원 환경연구부 환경연구사)  
 박정제 (전북보건환경연구원 환경연구부장)  
 유택수 (전북보건환경연구원 원장)