

2016년 제주지역 미세먼지의 농도 변화와 고농도 사례일의 기류이동 특성

김수미¹ · 김명찬¹ · 김길성¹ · 이기호^{2†}

¹제주특별자치도보건환경연구원 대기환경과

²제주대학교 환경공학과

Characteristics of the Concentration Variations and Air Mass Routes during the High-concentration Events of Particulate Matter in the Jeju Area in 2016

Su-Mi Kim¹, Myeong-Chan Kim¹, Kil-Seong Kim¹, and Ki-Ho Lee^{2†}

¹Air Environmental Division, Jeju Special Self-Governing Province Research Institute of Health & Environment, Jeju, 63142, Korea

²Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju, 63243, Korea

Received April 10, 2019/Revised May 17, 2019/Accepted June 19, 2019

This study investigates the concentration levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in the Jeju area in 2016 and the inflow routes of air masses during the high particulate matter concentration events (high-PM events) that occurred in the Jeju area using Hybrid Single Particle Lagrangian Intergrated Trajectory Model. The hourly mass concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in 2016 were obtained from three air pollution monitoring sites (Yeondong, Ido, and Donghong) in the Jeju Island. The average PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations at the three sites were 41.5, 45.7, and 36.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM₁₀ and 24.2, 23.2, and 18.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{2.5}, respectively. Statistically significant differences ($p < 0.001$) were observed between the PM concentrations at the northern (Yeondong and Ido) and southern (Donghong) parts of Mt. Halla. The PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were simultaneously increased during the high-PM events in the winter season. Furthermore, a time lag was observed between the PM concentrations at the northern and southern parts of Mt. Halla during the high-PM events. A backward trajectory cluster analysis was performed to analyze the effects of the inflow air mass on the air quality of the Jeju area during the high-concentration events of PM₁₀ and PM_{2.5}. The increase in PM_{2.5} concentrations for the high-PM events, except for the Asian dust events, was mainly influenced by the air masses transported from the eastern and northeastern areas of China.

Key words: PM₁₀, PM_{2.5}, episode, HYSPLIT, Jeju

1. 서 론

대기 중 입자상 물질(particulate matter)은 크기에 따라 직경이 10 μm 이하인 PM₁₀과 2.5 μm 이하인 PM_{2.5}로 구분하고 미세먼지와 초미세먼지라 지칭하고 있다. 미세먼지는 발생원에 따라 다양한 화학적 특성을 지니게 되며 기상, 지역적 특징, 시간의 변화에 따라 서로 차이를 보인다. 대기 중으로 배출된 미세먼지는 직경이 작을수록 공기 중에 오래 떠 있어 가시도를 저하^{1,2)}

시킬 뿐만 아니라 인체에 미치는 영향도 크다. 특히 폐 기능 장애, 호흡기 질환 또는 심혈관계 질환 환자 증가, 그리고 조기 사망 등이 주요한 건강장애 유형으로 나타나고 있으며,³⁻⁶⁾ PM₁₀ 보다 PM_{2.5}에 장기간 노출 시 심혈관 질환 등 건강상 위해성이 더 큰 것으로 보고되고 있다.^{4,6)} 이와 같은 악영향으로 인해 미세먼지에 대한 관리의 필요성이 대두되면서 우리나라는 1995년부터 대기환경기준에 PM₁₀을 포함시켜 관리하고 있으며, 특히 입경이 작은 미세먼지로 인한 건강 위해성에 대

[†]To whom correspondence should be addressed.

한 우려가 커짐에 따라 2015년부터는 대기환경기준에 $PM_{2.5}$ 항목을 추가하여 적용하였다. 그러나 최근 고농도 미세먼지의 발생빈도가 급증하면서 미세먼지 문제 해결에 대한 국민적 요구가 커짐에 따라 국가적 차원의 미세먼지 중장기 관리대책을 수립함과 더불어 미세먼지로 인한 민감계층의 건강피해를 줄이기 위해 $PM_{2.5}$ 대기환경기준을 크게 강화(24시간 평균 $35 \mu g/m^3$, 연평균 $15 \mu g/m^3$)하여 시행하고 있다.

제주도는 섬지역으로 해양의 영향을 많이 받고 있으며 1,950 m 높이의 한라산을 중심으로 북쪽 지역은 제주시, 남쪽 지역은 서귀포시로 구분되어 있는데, 서귀포시 지역보다 제주시 지역에서 인구밀집과 교통량의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 제주를 포함한 우리나라는 편서풍대에 위치하고 있어 우리나라의 서쪽에 인접한 중국으로부터 황사와 미세먼지를 비롯한 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 영향을 많이 받고 있기도 하다.^{7,9)}

우리나라에서는 이러한 지역적인 오염원의 영향과 장거리 이동 등에 의한 대기질을 파악하고 관리하기 위해 국가배경농도측정소, 도시대기측정소, 도로변측정소 등의 대기오염측정망을 전국적으로 설치하여 운영하고 있다. 제주지역에서도 현재 5개소의 도시대기측정소에서 미세먼지를 포함한 대기오염물질을 측정하고 있다. 이 중 3곳은 한라산을 중심으로 북부(제주시)와 남부(서귀포시)의 도심생활권 내에 설치되어 지속적으로 운영되고 있으며, 나머지 2곳은 제주지역의 비도심지역의 대기오염도를 파악하기 위해 아주 최근에 설치되어 운영되고 있다. 어느 지역의 특색에 맞는 대기질 관리방안을 모색하기 위해서는 그 지역에서 지속적인 오염물질의 농도관측이 필수적이며, 측정자료를 활용하여 지역 대기질에 대한 종합적인 분석이 이루어져야 한다. 하지만 제주지역에서는 상시 측정되고 있는 측정망 자료를 이용한 연구가 매우 부족한 실정이며, 대기환경기준에 $PM_{2.5}$ 항목이 추가되고 대기오염경보제가 시행되면서 제주지역에서도 PM_{10} 뿐만 아니라 $PM_{2.5}$ 에 대한 측정이 지속적으로 이루어지고 있음에 따라 제주지역 미세먼지의 오염 현황을 다각적으로 검토해 볼 필요가 있다. 특히 자동차 이외에 지역 대기질에 영향을 크게 미칠만한 규모가 큰 인위적 배출원이 거의 없는 제주지역에서도 고농도의 미세먼지가 수 시간 이상 지속되는 사례가 발생하고 있을 뿐만 아니라 지역적인 편차도 보이고 있어 이에 대한 원인분석도 지역 차원에서 시급한 실정이다.

이를 위해 본 연구는 우선적으로 제주의 도심지역에 설치 운영되고 있는 측정소 3곳에서 2016년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년 동안 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에 대한 연속적인 측정자료를 이용하여 미세먼지의 농도 수준을 알아보고, 제주지역에서 고농도 미세먼지가 발생할 때에 기류의 이동 패턴을 분석해 보고자 하였다. 이로서 향후 제주지역 미세먼지의 관리와 대응방안을 마련하는데 과학적인 근거 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 측정지점 및 자료수집

제주지역에서는 현재 5개 대기오염측정소(도시대기)를 운영하고 있으나 이 중 2개 측정소는 아주 최근 신설되어 측정자료가 누적되지 못한 실정이다. 본 연구에서는 연동, 이도동, 동홍동 측정소에서 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도자료를 활용하여 수행하였으며, 이 3곳의 측정소에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에 대한 시간별 측정자료가 모두 확보된 2016년 1월 1일부터 12월 31일까지의 1년간을 연구기간으로 설정하였다. 대기오염측정망 설치·운영 지침의 통계처리 방법에 따르면, 각 측정기간의 유효자료처리비율은 75% 이상으로 적용하고 있다.¹⁰⁾ 연구기간 동안 각 측정소의 유효가동율은 PM_{10} 의 경우 연동 95.4%, 이도동 90.5%, 동홍동 93.4%, $PM_{2.5}$ 의 경우 연동 94.6%, 이도동 97.8%, 동홍동 95.9%이었다.

연동과 이도동 측정소는 제주시 도심지역, 동홍동 측정소는 서귀포시 도심지역에 속해 있다. 특히 연동과 이도동 측정소는 도청과 시청 건물 옥상에 설치되어 있으며 차량 통행이 많고 정체현상도 심할 뿐 아니라 주변에 상가, 주택이 밀집되어 있는 생활의 중심지에 위치해 있다. 또한 동홍동 측정소는 제주시에 비해 도시화가 비교적 덜 진행되었으나 서귀포시의 중심지로 인구와 차량이 지속적으로 증가하고 있는 주거생활권 내에 위치해 있다. 이들 측정소는 모두 그 지역의 도시 대기질을 대표하는 측정지점이며, Fig. 1에 3개 측정소의 위치를 나타냈다.

본 연구에서는 각 측정소에서 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도자료를 이용하여 지역적, 계절별 평균농도를 비교하기 위해 분산분석을 실시하여 통계적 유의성을 검증하였으며, 통계분석에는 SPSS v.18.0을 사용하였다.

2.2. 역궤적 분석

본 연구에서는 오염물질의 장거리 이동을 수반하는

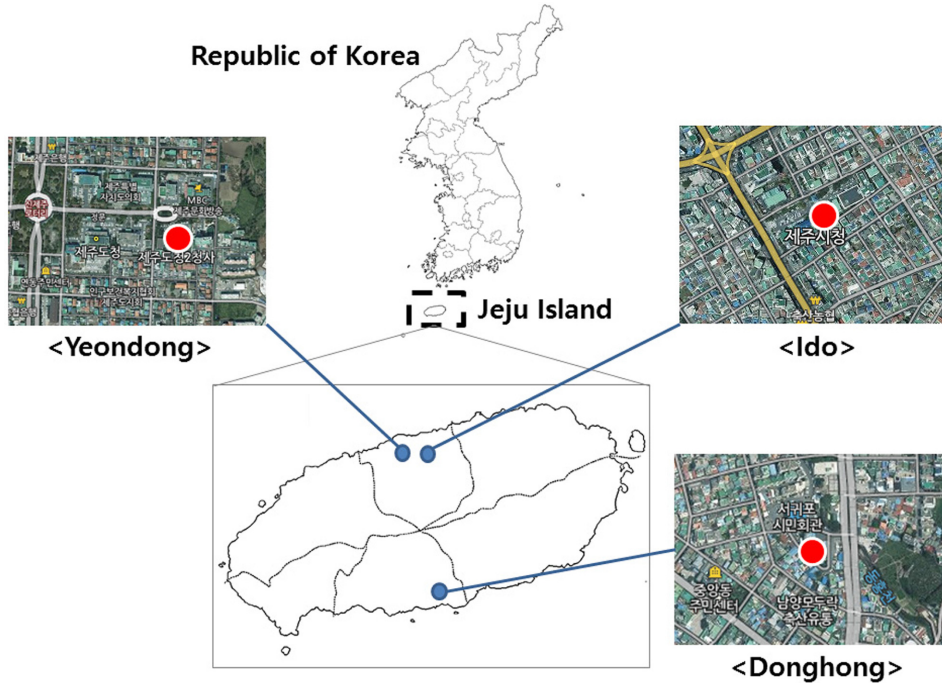


Fig. 1. Location of the urban air pollution monitoring sites in the Jeju Island.

기류의 이동경로 추적을 위해 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하고 있는 HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) 모델¹¹⁾을 이용하여 역궤적 분석을 수행하였다. 역궤적 분석을 통해 측정지점에 도달하는 오염물질의 장거리 이동과 공기의 흐름 패턴을 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 역궤적 분석을 위해 제주도 북부지역에 위치해 있는 도심생활권인 연동지역(33.49°N, 126.50°E)을 시작지점으로 설정하였다. 역궤적 분석에 사용되는 기상자료는 GDAS (Global Data Assimilation System)의 기상자료를 이용하였다. 시작고도는 500 m로 설정하였고, 72시간 동안의 역궤적을 산출하였다. 역궤적 계산시 시작시간은 대기오염측정소의 매시간 측정자료와 일치시킬 수 있도록 1시간 단위로 역궤적을 추출하여 군집분석(cluster analysis)을 실시하였다. 제주지역에서 2016년 기간 동안 고농도 미세먼지 발생일에 시간별로 계산된 역궤적 계산결과를 바탕으로 설정위치에 도달하는 역궤적의 유사성에 따라 군집을 분류하였다. 최적의 군집수는 군집별로 계산된 총공간변동량(TSV: total spatial variance)을 바탕으로 TSV가 급격히 변화하는 시점 이전에서 결정되며,⁹⁾ 본 연구에서는 Fig. 2의 결과에 따라 최적

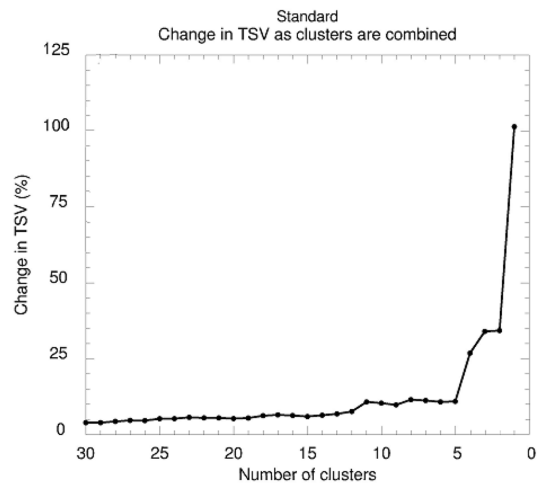


Fig. 2. Change in the total spatial variance (TSV) in the form of clusters.

의 군집수를 총 5개로 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도수준

제주지역 대기오염측정소에서 2016년 1년 동안 측정

Table 1. Annual mean concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} observed at the Jeju area

Site	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} /PM ₁₀
Average	41.2 ± 20.8	22.0 ± 13.3	0.54
Yeondong	41.5 ± 21.1	24.2 ± 14.5	0.58
Ido	45.7 ± 22.0	23.2 ± 13.7	0.52
Donghong	36.4 ± 18.0	18.5 ± 10.9	0.52

된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 연평균 농도를 Table 1에 정리하였다. 제주지역 3곳에서 관측된 PM₁₀의 연평균 농도는 41.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, PM_{2.5}는 22.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. PM₁₀은 우리나라 연평균 대기환경기준치(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 만족하였고, PM_{2.5}의 경우 2016년도에 적용되었던 연평균 기준치(25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 만족하였으나 최근 개정된 기준(15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 크게 초과하는 수준이었다. 제주지역 PM₁₀ 연평균 농도는 2016년에 중국 전역에 분포되어 있는 측정망에서 관측된 PM₁₀ 평균농도의 1/2 수준이었으며, 미국전역에서 측정된 농도보다는 2배 정도 높은 수치를 보였다. 또한 제주지역 PM_{2.5} 연평균 농도는 중국에서 측정된 PM_{2.5} 농도의 1/2 수준이었으나 미국의 PM_{2.5} 농도보다는 2.7배 높았다.¹²⁾

연구기간 동안 제주시에 위치한 연동과 이도동 측정소에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 서귀포시에 위치한 동홍동 측정소에 비해 1.2배 이상 높게 나타났다. 특히 연동과 이도동에서의 PM_{2.5} 농도는 최근 개정된 연평균 기준의 1.5배, 동홍동에서의 농도는 연평균 기준의 1.2배 높은 것으로 나타났다. 이처럼 미세먼지의 농도에 있어서 제주시 지역과 서귀포시 지역 사이에도 상당한 농도 차이가 나타나는 것으로 관찰되었으며, 이러한 차이는 통계적으로도 유의한($p < 0.001$) 것으로 나

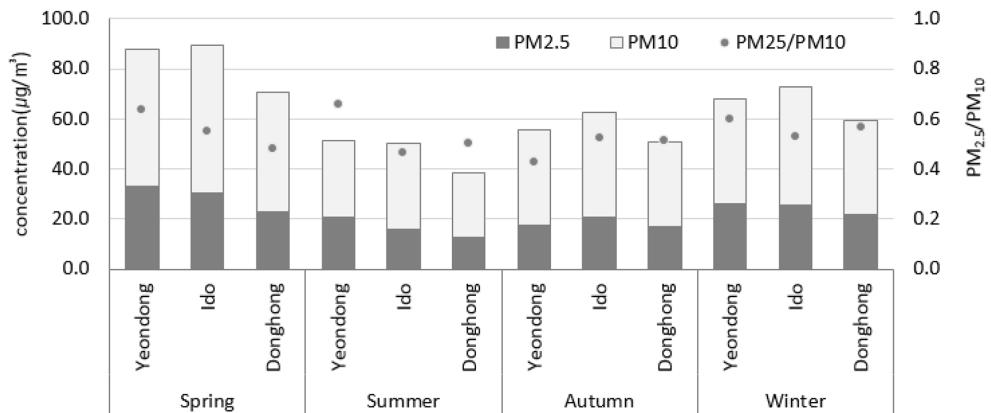
타났다. 이는 제주도에서 한라산의 북쪽에 위치한 제주시 지역은 북서풍의 영향을 직접 받고 있으므로 인해 미세먼지의 농도가 높은 것으로 생각된다. 북서풍 계열의 기류가 제주시로 유입될 때 미세먼지의 농도도 높게 나타난다고 알려진 바도 있다.¹³⁾ 또한 북서풍을 타고 유입된 오염물질이 제주도의 남쪽지역으로 이류되어 가는 과정에서 한라산의 방해로 인해 한라산 남쪽에 위치한 서귀포시 지역의 농도에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이 외에도 제주시 지역은 서귀포시 지역에 비해 인구집중 그리고 교통량 증가와 차량 정체 현상 등이 심하기 때문에 지역간 농도 차이가 나타날 수도 있다고 판단된다. 연구기간 동안 각 측정소에서 측정된 PM_{2.5}/PM₁₀ 비를 보면(Table 1), 연동에서는 0.58, 이도동과 동홍동에서 측정된 비는 0.52로 차량 증가와 도시화가 비교적 빠르게 진행되고 있는 연동 지역이 약간 높은 값을 나타내었다.

이러한 측정소별 그리고 지역별 농도의 차이에 대해서는 최근 측정소 확충과 측정자료가 축적되고 있음에 따라 지속적인 관측이 필요할 것으로 판단된다.

Table 2는 2016년 1년 동안 제주지역 3개 도시대기 측정소에서 관측된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 계절별 평균농도를 나타낸 것이고, Fig. 3은 계절에 따른 평균 농도를

Table 2. Seasonal concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} at the Jeju area

Season	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} /PM ₁₀
Spring	54.0 ± 22.6	28.8 ± 12.3	0.55
Summer	30.4 ± 10.2	16.2 ± 8.6	0.53
Autumn	38.2 ± 13.0	18.3 ± 8.7	0.48
Winter	42.4 ± 22.0	24.4 ± 15.4	0.56

**Fig. 3.** Seasonal variations in the PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at the monitoring sites in the Jeju area.

측정소별로 나타낸 것이다. 제주지역에서 측정된 PM₁₀의 계절별 평균농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 54.0, 30.4, 38.2, 42.4 μg/m³이었고 PM_{2.5}는 각각 28.8, 16.2, 18.3, 24.4 μg/m³이었다. 계절별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 평균 농도는 봄 > 겨울 > 가을 > 여름 순으로 높게 나타났으며, 이러한 계절별 평균 농도는 통계적으로도 유의한 차이(p<0.001)가 있는 것으로 확인되었다. PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 계절변화 경향은 모든 측정소에서 유사하였으며, 모든 계절에 연동과 이도동 측정소가 동흥동 측정소보다 높은 농도를 나타내었다. 그리고 제주시에서는 PM₁₀의 경우 연동보다는 이도동에서 다소 높은 농도 수준을 나타냈으나, PM_{2.5}는 가을철을 제외한 모든 계절에서 오히려 연동이 이도동보다 높은 수준을 보였다. 특히 연동에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율이 봄철에도 높았지만 여름철에 0.66으로 가장 높게 나타났다. 기존 연구에서 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 입자상 물질의 생성과정과 기상, 지역적 조건에 의해 영향을 받기 때문에 지역, 계절, 시간에 따라 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 차이를 보이고 있었으며, 비교적 인위적 오염원에 의한 영향으로 미세입자의 발생량이 많은 공업지역과 차량 통행이 많은 도시지역에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높았고, 2차 에어로졸의 기여가 큰 영향을 미치는 여름철에 높은 값을 나타내기도 하였다.^{15,16)} 또한 제주시 연동측정소에서 수행한 기존 연구에서도,¹³⁾ 2차 에어로졸 성분(Σ(SO₄²⁻+NH₄⁺+NO₃⁻))의 농도가 여름철에 가장 높았고 다음으로 봄철이 높은 것으로 나타났다.

3.2. 고농도 사례일

Fig. 4는 제주지역에서 관측된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 일평균 농도의 변화 추이를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 여름철과 가을철에 비해서 봄철과 겨울철에 PM₁₀과

PM_{2.5} 농도의 변동폭이 큰 것을 볼 수 있다. 2016년 동안 제주지역에서 PM₁₀과 PM_{2.5}의 고농도 사례일(일평균 농도를 기준으로 PM₁₀ 100 μg/m³ 또는 PM_{2.5} 50 μg/m³ 이상으로 나타난 날)을 살펴보면, PM₁₀은 봄철에 3회, 겨울철에 2회가 나타났고 PM_{2.5}는 봄철에 5회, 여름철에 1회, 겨울철에 5회로 나타났다. 제주지역에서 PM₁₀과 PM_{2.5}의 고농도 사례일은 봄과 겨울철이 타 계절에 비해 자주 발생하였으며, 봄철에 나타난 PM₁₀ 고농도 발생일은 제주지역에서 황사가 관측된 날이었다.

2016년 4월 24일, 4월 25일, 5월 7일에는 제주지역에서 황사가 관측된 날이며¹⁷⁾, 이 날의 PM₁₀ 일평균 농도는 각각 137.0, 103.9, 144.4 μg/m³로 높았으나 PM_{2.5} 일평균 농도는 28.0~47.0 μg/m³ 수준으로 나타났다. 또한 황사가 관측되지 않은 1월 4일과 12월 5일에도 PM₁₀ 농도가 116.6 μg/m³과 130.3 μg/m³로 높았으며, 특히 이 날의 PM_{2.5} 농도는 2016년 1년 동안 제주지역에서 가장 높은 농도를 나타냈다. 이처럼 겨울철에 고농도가 발생하는 것은 우리나라가 편서풍대에 위치하고 있어 중국으로부터 유입되는 오염물질의 영향을 지속적으로 받고 있으며, 특히 겨울철에는 중국 동북부 지역을 통과한 기류가 유입되면서 제주지역에 PM₁₀과 PM_{2.5}가 고농도를 나타내는 것으로 보인다.^{13,14)}

Table 3에는 본 연구기간 동안 제주지역에서 황사에

Table 3. PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations during the Asian dust, episode, and ordinary days observed at the Jeju area

	Asian dust	Episode	Ordinary
PM ₁₀ (μg/m ³)	128.4 ± 21.6	92.7 ± 16.5	38.9 ± 15.4
PM _{2.5} (μg/m ³)	38.1 ± 9.5	65.6 ± 11.9	20.4 ± 9.8
PM _{2.5} /PM ₁₀	0.29	0.71	0.51

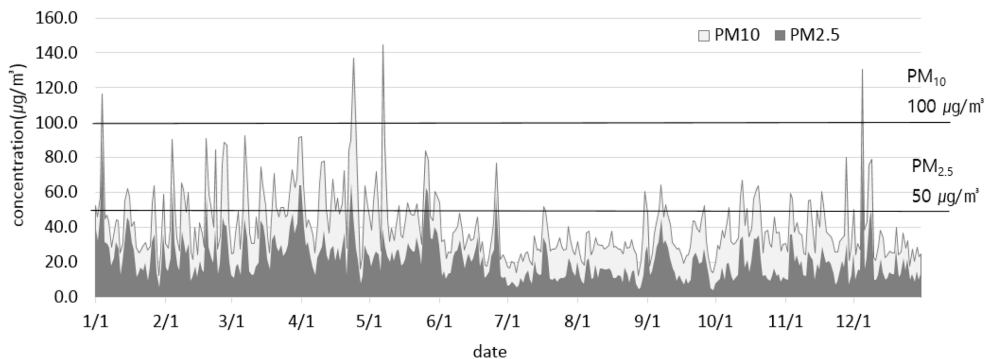


Fig. 4. Daily variations in the PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations (μg/m³) at the Jeju area.

의한 미세먼지 고농도 사례일(Asian dust), 황사 시기를 제외한 미세먼지 고농도 사례일(Episode) 그리고 평상시(Ordinary days)에 대한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 평균 농도를 나타내었다. 황사에 의한 미세먼지 고농도 사례일의 미세먼지 농도를 제주지역 연평균 농도와 비교하여 보면, PM_{10} 의 농도가 아주 높게 관측되었고 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 0.29로 아주 낮은 것으로 나타났다. 부산지역에서도 평상시의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 0.51~0.59이었지만, 황사 시에 유입되는 입자에는 미세입자보다 조대입자의 비율이 높기 때문에 이 때는 0.16~0.28로 크게 낮은 값을 보였다.¹⁵⁾ 한편 황사 시기를 제외한 미세먼지 고농도 사례일에 PM_{10} 농도는 $92.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평상시 평균 농도($38.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교하면 2.4배 증가하였고, $PM_{2.5}$ 농도도 $65.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평상시($20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 3.2배 높은 것으로 관측되었다. 또한 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비도 0.71로 높은 값을 나타내었다. 자동차 외에는 지역의 대기질에 큰 영향을 미칠만한 뚜렷한 배출원이 없는 제주지역에서 황사 기간에는 미세입자 보다는 조대입자가 다량 유입되어 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비가 크게 낮은 값을 나타내었으나 그 외 고농도 사례일의 경우에는 주로 인위적 기원인 미세입자($PM_{2.5}$)의 비중이 크게 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 5(a)와 (b)에는 제주지역에 나타난 미세먼지 고농도 사례일에 대해 측정소별 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 변동 패턴을 나타낸 것이다. 한라산의 북쪽에 위치한

연동과 이도동 측정소의 경우 서로 비슷한 변동 추이를 보이고 있으나, 한라산의 남쪽에 위치한 동홍동 측정소의 경우 대체적으로 연동과 이도동의 농도보다 낮은 분포를 보이면서 연동과 이도동의 농도 변동 패턴과도 시간 차이를 두고 농도의 증감이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 제주지역으로 유입된 오염물질의 이동이 한라산에 의해 방해받기 때문에 나타난 현상이라고 생각된다.

3.3. 고농도 사례일에 대한 기류의 유입 경로 분석

본 연구에서는 제주지역에서 관측된 미세먼지 고농도 사례일을 중심으로 제주지역으로 유입되는 기류의 이동경로를 파악하여 제주지역 대기질과의 관계를 살펴 보고자 하였다. 이를 위해 먼저 2016년 동안 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 고농도 사례(Table 3, Fig. 5)에 대해 매 시간 제주지역에 유입되는 기류의 이동경로에 대한 역궤적 군집분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Cluster 1은 주로 중국대륙에서 허베이성, 산둥성, 허난성을 포함한 동북부 지역을 거쳐 제주로 유입되는 기류로서 26%가 유입된 것으로 나타났으며, Cluster 2의 경우는 시베리아에서 몽골을 거쳐 유입되는 기류로 8%의 발생빈도를 보이고 있었다. Cluster 3은 주로 중국대륙에서 상하이, 항저우시 지역을 포함한 동부지역을 통해 유입되는 기류로 36%, Cluster 4는 한반도를 거쳐 유입되는 경로로 21%의 유입 빈도를

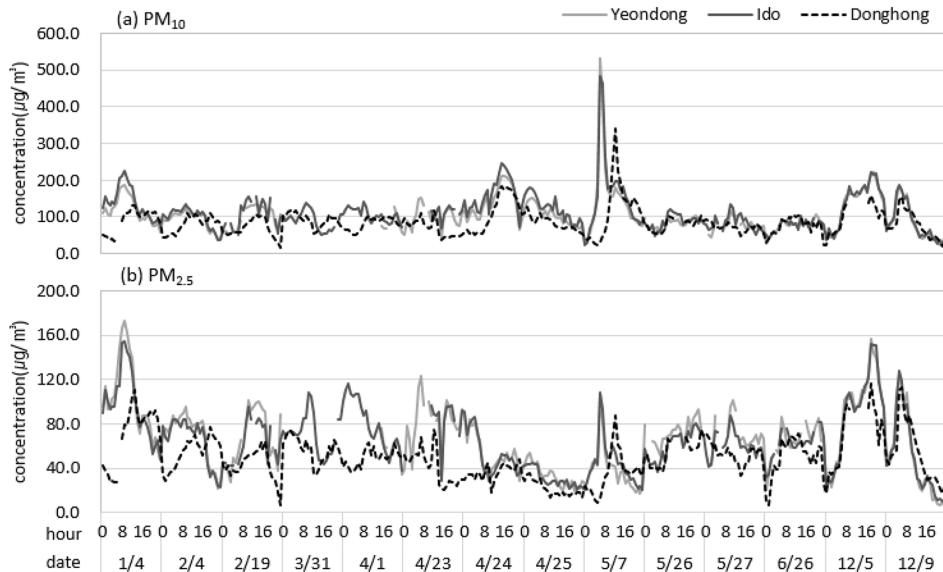


Fig. 5. Hourly variations in the concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at the monitoring sites in the Jeju area during episodes, including Asian dust: (a) PM_{10} and (b) $PM_{2.5}$.

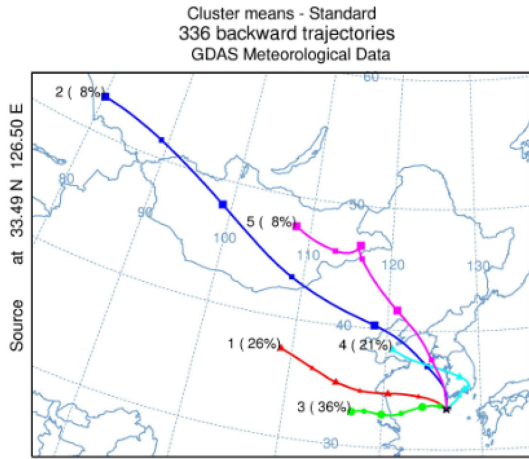


Fig. 6. Backward trajectory clusters of the air mass affecting the air quality of the Jeju area during various episodes, including Asian dust.

보이는 것으로 분석되었다. Cluster 5는 몽골지역에서 유입되는 경로로서 8%의 발생 빈도로 제주지역에 유

입되었다. 전반적으로 제주지역에서 고농도 미세먼지가 발생하는 경우에는 중국대륙을 통해 유입되는 경우 (Cluster 1과 3)가 가장 높은 빈도(62%)를 나타내었고, 한반도를 거쳐 유입되는 경로(Cluster 4)가 그 다음으로 높은 빈도(21%)를 나타냈다.

Fig. 7에는 미세먼지 고농도 사례일에 대해서 매 시간에 따른 제주지역 평균농도 변화와 그 때의 기류 유입경로를 분석하여 함께 나타냈다. 전반적으로 제주지역에서 황사가 발생했던 4월 24일, 4월 25일, 5월 7일에는 주로 Cluster 4와 5의 경로를 따라 유입되는 것으로 나타났다. Fig. 8은 4월 24일부터 25일까지 발생한 황사 사례의 초반에서 후반까지 제주지역으로 유입되는 기류의 이동경로를 나타낸 것이다. 제주지역에서 4월 24일부터 시작된 황사를 보면 제주지역에서 황사 발생 초기에는 몽골의 고비사막 지역을 통과한 기류가 유입되면서(Fig. 8(a)) PM₁₀ 농도가 증가하기 시작하였고 한반도 남부지역을 통과한 기류가 제주지역으로 유입되면서(Fig. 8(b)) PM₁₀ 농도는 최고조(214.0 μg/m³)

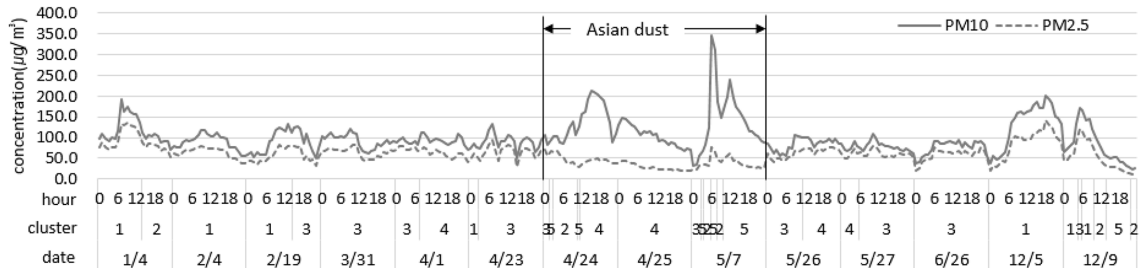


Fig. 7. Hourly variations in the PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations (μg/m³) at the Jeju area by clusters during the high-concentration episodes, including Asian dust.

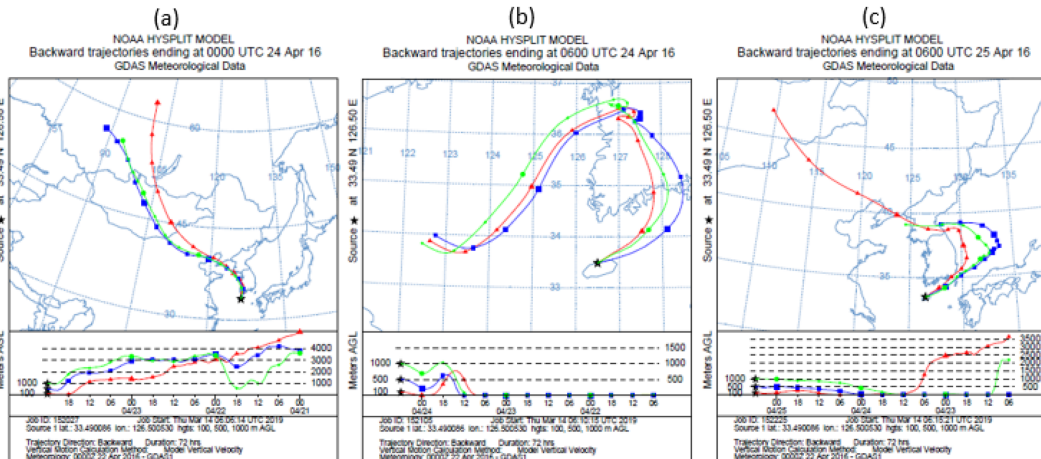


Fig. 8. Transport pathway of the air mass during the Asian dust episode on April 24 and 25.

에 달하였으며, 이후 25일 오후부터는 기류가 동해를 거쳐 이동해 오면서 농도가 낮아졌다(Fig. 8(c)). 기상청 자료에 의하면, 이 시기에 나타난 황사는 서울지역에서는 22일부터 24일까지, 광주지역에서는 23일부터 25일까지, 제주지역은 24일부터 25일까지 황사가 지속된 경우인데,¹⁷⁾ 우리나라 남부지역이 중부지역보다 하루 늦게 황사가 관측되었고 제주지역에서는 이보다 하루 더 늦은 24일부터 고농도로 상승하기 시작하였다. 이 시기에 제주도에 유입된 황사는 우리나라 남부지역의 풍속이 낮아 대기오염물질이 남부 내륙에 머물렀고⁹⁾ 서서히 제주지역에도 영향을 미치면서 고농도를 나타낸 것으로 보인다. 그러나 5월 7일에 나타난 황사는 몽골지역에서 우리나라 서해안을 거쳐 제주지역으로 유입되는 경로를 따라서(Cluster 2와 5) 기류가 지속적으로 제주지역으로 유입되면서 황사 초기에 짧은 시간 동안 PM₁₀ 농도가 급격하게 증가하였다. 이 날 제주지역 PM₁₀ 1hr 평균농도는 최고 347.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 제주지역에서 2016년 4월 24일과 25일 그리고 5월 7일에 나타난 미세먼지 고농도 사례일에는 기류가 유입됨에 따라 PM₁₀ 농도에 있어서 뚜렷한 증가를 나타냈지만 PM_{2.5} 농도에 있어서는 변동이 크게 나타나지 않았다.

2016년에는 1월과 12월에도 한 차례씩 PM₁₀ 고농도 사례일이 나타났다. 이 때에는 황사 사례일과는 달리 PM_{2.5}도 PM₁₀과 동일한 농도 변동 패턴을 보이면서 아주 높은 농도가 관측되었다. 앞에서 설명한 바와 같이, 이 날(2016년 1월 4일과 2016년 12월 5일)에는 PM₁₀ 평균농도가 각각 116.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 130.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 각각 90.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 85.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모두 높은 농도를 나타내었으며, 기류는 중국 동부지역인 장쑤성, 산둥성을 거쳐 우리나라 남해상을 통해 유입(Cluster 1)된 것으로 파악되었다. 이러한 기류의 영향으로 1월 4일 제주지역에서 최고로 관측된 PM₁₀ 1hr 평균농도는 192.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 135.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 12월 5일에는 PM₁₀이 200.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 141.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 치솟았다. 2016년 제주지역에서 관측된 대부분의 PM_{2.5} 고농도 사례일에 기류는 주로 중국 동부와 동북부 지역에서 유입되면서(Cluster 1과 3) 농도도 높게 유지되는 것으로 나타났다. 중국의 동북부 지역은 2014년부터 2017년까지 중국에서도 가장 높은 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 관측된 BTH(Beijing-Tianjin-Hebei), YRD(Yangtze River Delta) 지역이 위치하고 있으며,¹²⁾ 이들 지역에서 배출된 오염물질이 기류의 이동에 따라 제주지역으로 이동하면서 제주지역의 대기질에 영향을 미치는 것

으로 판단된다. 특히 PM_{2.5} 고농도 사례가 많이 발생한 겨울철에는 중국에서 난방 등으로 인한 오염물질의 배출이 심해지면서 제주지역 미세먼지의 농도 분포에도 상당한 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다.

이상과 같이 제주지역의 미세먼지 농도는 제주지역으로 유입되는 기류의 이동경로에 따라 차이를 보이고 있었다.

4. 결 론

본 연구는 제주지역에서 운영중인 도시대기측정소 3곳에서 2016년 1월 1일부터 12월 31일까지 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 시간별 농도 자료를 이용하여 제주지역 미세먼지의 농도 변화를 살펴보고, 연구기간 동안 고농도 미세먼지 발생 시 기류의 이동경로를 분석하여 제주지역 대기질과의 관계를 파악해 보았다.

제주지역 PM₁₀의 연평균 농도는 41.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 22.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 봄 > 겨울 > 가을 > 여름 순으로 황사를 비롯한 외부로부터 미세먼지의 유입이 많은 봄철에 가장 높았다. 그리고 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 한라산을 중심으로 남쪽에 위치한 동홍동 측정소 보다는 북쪽에 위치한 연동과 이도동 측정소에서 높게 나타났다.

2016년에 제주지역의 PM₁₀ 고농도 발생일수는 봄 3회, 겨울 2회였고 PM_{2.5} 고농도 발생일수는 봄 5회, 여름 1회, 겨울 5회로 조사되었다. 봄철에 나타난 PM₁₀ 고농도 발생일은 제주지역에서 황사가 관측된 날이었다. 이러한 고농도 사례일에는 한라산을 중심으로 산남지역과 산북지역의 농도 변화 패턴에도 차이를 보였다.

제주지역에서 고농도 미세먼지가 발생한 날에 대해 기류의 유입 경로를 보면, 중국대륙을 통해 유입되는 경로(Cluster 1과 3)가 62%로 가장 많은 빈도를 나타내었고, 다음으로는 한반도를 통과하여 유입되는 경로(Cluster 4)가 21%로 높은 빈도를 나타냈다. 2016년 4월 24일부터 25일까지 제주에서 발생한 황사는 몽골의 사막지역을 통해 유입된 기류가 한반도 남부지역에 머무르면서 서서히 제주로 이동하여 제주지역 대기질에 영향을 주었고, 5월 7일에 나타난 황사는 몽골에서 서해안을 거쳐 제주로 유입된 것으로 파악되었다. 겨울철에 나타난 PM₁₀ 고농도 사례일에는 PM_{2.5}의 농도도 연중 최고로 관측되었는데, 이 때는 중국 동북부 지역에서 기류가 유입되었다. 또한 연구기간 동안 제주지역에서는 대체적으로 중국 동부와 동북부지역을 통과

한 기류가 유입될 때 $PM_{2.5}$ 의 농도가 크게 증가하였다.

이상과 같이 제주지역 대기 중 미세먼지의 농도분포는 제주지역으로 유입되는 기류의 이동경로와 지형적 특색에 따라 차이를 보임을 알 수 있었다.

최근 정부의 미세먼지 관리 정책이 강화되면서 대기 오염측정망도 꾸준히 확충되고 있으며, 그에 따라 측정자료도 지속적으로 확보되고 있다. 또한 제주지역에서는 2015년부터 대기오염경보제가 시행되면서 고농도 미세먼지 발생 시 주의보 발령권역을 제주도 전지역을 하나의 권역으로 적용하여 왔으나, 본 연구에 제시된 바와 같이 한라산의 북쪽 지역과 남쪽 지역에 위치한 측정소에서 관측된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도변동에서 차이를 보이고 있다. 따라서 향후 주의보 발령권역의 세분화에 대한 검토가 필요하며, 제주도 동쪽과 서쪽지역에서의 측정자료가 확보되면 이에 대한 종합적인 평가가 가능해질 것으로 판단된다. 지역마다 설치된 대기오염측정소의 측정자료를 활용한 연구를 통해 향후 제주지역 미세먼지에 미치는 영향인자를 파악할 수 있을 뿐 아니라 고농도 미세먼지 발생에 대한 대응방안을 마련하는데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원 “환경분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반구축 사업”의 예산 중 일부를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. NASTRO, “Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment”, **2004**, 325-341.
2. Y.J. Liu, T.T. Zhang, Q.Y. Liu, R.J. Zhang, Z.Q. Sun, and M.G. Zhang, “Seasonal Variation of Physical and Chemical Properties in TSP, PM_{10} and $PM_{2.5}$ at a Roadside Site in Beijing and Their Influence on Atmospheric Visibility”, *Aerosol and Air Quality Research*, **2014**, 14, 954-969.
3. F. Dominici, R.D. Peng, M.L. Bell, L. Pham, A. McDermott, S.L. Zeger, and J.M. S-met, “Fine Particulate Air Pollution and Hospital Admission for Cardiovascular and Respiratory Diseases”, *Journal of the American Medical Association*, **2006**, 295(10), 1127-1134.
4. J. Feng and W. Yang, “Effects of Particulate Air Pollution on Cardiovascular Health: A Population Health Risk Assessment”, *PLoS ONE*, **2012**, 7(3): e33385.
5. N. Martinelli, O. Olivieri, and D. Girelli, “Air particulate

matter and cardiovascular disease: A narrative review”, *European Journal of Internal Medicine*, **2013**, 24, 295-302.

6. L.A. McGuinn, C. Ward-Caviness, L.M. Neas, A. Schneider, Q. Di, A. Chudnovsky, J. Schwartz, P. Koutrakis, A.G. Russell, V. Garcia, W.E. Kraus, E.R. Hauser, W. Cascio, D. Diaz-Sanchez, and R.B. Devlin, “Fine particulate matter and cardiovascular disease: Comparison of assessment methods for long-term exposure”, *Environmental Research*, **2017**, 159, 16-23.
7. 이순봉, 강창희, 정덕상, 고희정, 김행범, 오용수, 강혜림, “제주도 고산지역 TSP, $PM_{2.5}$ 대기 에어로졸의 조성 및 오염 특성”, *한국분석과학회지*, **2010**, 23(4), 371-382.
8. 고희정, 임은하, 송정민, 김원형, 강창희, 이해영, 이철규, “국내 배경지역 대기 미세먼지의 기류 이동경로별 조성변화: 2013년 측정”, *한국대기환경학회지*, **2015**, 31(1), 25-27.
9. 임철수, 정선아, 조미라, 이상보, 김정수, “광주지역 미세먼지의 장거리이동 영향 연구 - 2016년 봄철 사례를 중심으로”, *한국도시환경학회지*, **2017**, 17(4), 373-385.
10. 환경부, “대기오염측정망 설치·운영 지침”, **2016**, 22-26.
11. R.R. Draxler and G.D. Hess, “Description of the HYSPLIT 4 modeling system”, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, **2018**, NOAA Air Resources Laboratory.
12. X. Yang, L. Jiang, W. Zhao, Q. Xiong, W. Zhao, and X. Yan, “Comparison of Ground-Based $PM_{2.5}$ and PM_{10} Concentrations in China, India, and the U.S.”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2018**, 15(7), 1382.
13. 김수미, 김길성, 현성수, 김정하, 김명찬, 김봉진, 이기호, “2017년 제주시 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 화학적 조성 과 오염원 추정”, *한국환경분석학회지*, **2018**, 21(2), 61-70.
14. 신혜정, 임용재, 김정훈, 정해진, 박승명, 박종성, 송인호, 서석준, 홍유덕, 한진석, “고농도 미세먼지 사례 특성 분석-2014년 2월 사례를 중심으로”, *한국도시환경학회지*, **2014**, 14(3), 223-232.
15. 전병일, “부산지역 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도의 시간 및 공간적 변화 특성”, *한국환경과학회지*, **2010**, 19(8), 1013-1023.
16. L.H. Tecer, P. Suren, O. Alagha, F. Karaca, and G. Tunçel, “Effect of Meteorological Parameters on Fine and Coarse Particulate Matter Mass Concentration in a Coal-Mining Area in Zonguldak, Turkey”, *Journal of Air & Waste Management Association*, **2008**, 58, 543-552.
17. 기상청, <http://www.weather.go.kr/weather/asiandust/observ-day.jsp>, 2019년 2월.