

전라남도 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 특성 분석

이상득[†] · 임은태 · 방성훈 · 박형진 · 김인수 · 오성현*

태림인더스트리(주) · *빛가람기후변화대응교육센터

(2019년 10월 11일 접수, 2019년 10월 24일 수정, 2019년 10월 30일 채택)

On the Characteristics Analysis of PM₁₀, PM_{2.5} Concentrations in Jeonnam-Area

Sang-Deug Lee[†] · Eun-Tae Lim · Sung-hoon Bhang

Hyung-Jin Park · In-Soo Kim · Sung-Hyun Oh*

Terim Indestry Co., Ltd.

**Bitgaram Climate Response and Education Center*

(Received 11, October 2019, Revised 24, October 2019, Accepted 30, October 2019)

Abstract

In order to investigate the characteristics of PM₁₀, PM_{2.5} in Jeonnam area, this study analyzed data of the air quality measuring station in Jeonnam operated in Jeollanam-do. By using the hourly data collected for 4 years(2015~2018), the study examined the characteristic of the concentration measured yearly, monthly, hourly, and by the measurement sites. Moreover, the study explored the generation characteristics and Yellow dusty, High Concentration PM₁₀ of 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or more. As a result, the concentration of PM₁₀, PM_{2.5} exceeded the national air quality standard of 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ as 54.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 23.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the phase from 2015 and 2018, respectively. The ratio of PM_{2.5}/PM₁₀ concentration varies slightly from station to station within a range of 57.7 to 64.1%, and was high in Nabuli and Jinsang. The ratio of PM_{2.5}/PM₁₀ concentration on the day of high concentration of PM₁₀ was the highest at 70.7% in autumn, and was the lowest at 37.3% in spring. The ratio of PM_{2.5}/PM₁₀ on the day of yellow dust appeared in the range of 24.4 to 34.6%. The PM_{2.5} concentration was low in fall. The PM_{2.5}/PM₁₀ ratio between high PM₁₀ concentration date and yellow dust occurrence date is due to elevated PM_{2.5} concentration on the high PM₁₀ concentration date; secondary materials produced by photochemical reactions from sulfur oxides, nitric oxides and VOCs are considered to contribute to the elevated PM_{2.5} concentration.

Keywords : Yellow dust, PM₁₀, PM_{2.5} concentration, Synoptic, Spatial comparison, Jeonnam Area

1. 서론

정부는 과학기술을 통해 미세먼지 문제에

대한 근본적·혁신적 해결을 지원하고, 미세먼지 특별법¹⁾을 시행하여 지역차원의 체계적인

[†]Corresponding author E-mail: mokpo2484@hanmail.net

미세먼지 관리대책 시행 등 미세먼지 문제해결을 최우선 과제로 설정하였다. 또한 2022년까지 미세먼지 배출량을 30% 감축하는 강력하고 촘촘한 미세먼지 관리대책 등을 추진하고 있다.

이러한 정부의 강력한 의지와 지속적인 미세먼지 감축 노력에도 불구하고 실질적인 대기질 개선은 미비하며, 배출원에서의 배출량이 감소하고 있음에도 최근 고농도 미세먼지가 빈번히 발생하고 있다. 우리나라는 1993년부터 PM_{10} 을 대기환경 기준 물질로 채택하여 규제하고 있으며, PM_{10} 의 대기환경 기준 농도는 연평균 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2018년 7월부터 $PM_{2.5}$ 은 연평균 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균은 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 선진국 기준과 동일한 수준으로 개정하여 강화된 기준으로 대기질을 관리하고 있다.

대기 중에 부유하고 있는 입자상 대기오염 물질은 크게 초미세먼지 ($PM_{2.5}$)와 미세먼지 (PM_{10})로 구분되며, 공기역학적 지름이 각각 $2.5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 이하의 먼지를 의미한다²⁾. 입자상오염물질은 발생원에서 직접 배출되는 1차 입자상물질과 대기 중 포함되어 있는 대기오염물질과 광화학반응에 의해 생성되는 2차 입자상물질로 구분된다. 일반적으로 지름이 $2.5 \mu\text{m}$ 보다 큰 먼지는 마찰 등의 기계적인 기작에 의해 생성되고 있다. 1차 입자상 대기오염물질은 화력발전소, 화학공장, 공사장 등에서 직접 배출되는 물질을 말하며, 비산먼지, 화산재, 황사, 자동차 브레이크 마모 먼지가 대표적인 예이다. 지름이 $2.5 \mu\text{m}$ 보다 작은 초미세먼지는 이와는 다르게 일반적으로 화학반응에 의해 형성된다고 알려져 있다³⁾. 경유자동차 엔진의 연소에서 발생하는 검댕이나 대기에서 기체상 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs) 등이 반응해서 생성되는 황산염 입자와 질산염 입자, 유기 입자상입자가 2차 대기오염물질의 대표적인 물질이다⁴⁾.

미세먼지가 인체에 미치는 영향은 노출 시

간과 농도에 따라 피해가 다르며, 그 영향도 매우 다양하게 나타나고 있다. 대기 중에 유해 중금속과 산성산화물, 유기화합물질, 기타 화합물질과 쉽게 반응을 일으킬 뿐 아니라 대기 중에 있는 박테리아, 바이러스 등의 미생물을 운반하기도 한다⁵⁾. 또한, 호흡을 통해 폐포에 축적되어 염증과 폐질환을 일으키기도 하고, 혈관에 흡착되어 심혈관 기관에 악영향을 초래하기도 한다. 따라서, 심혈관, 뇌혈관, 호흡기 질환 및 암과의 연관성⁶⁾도 속속 밝혀지고 있으며, 이 밖에도 암중에 대한 연구가 현재 진행 중이다. WHO 국제암연구소는 2013년부터 대기오염과 미세먼지를 각각 사람에게 충분한 발암 근거가 있다고 보고 1급 발암 물질로 분류하고 있다.

조태진 등⁷⁾은 제철소 주변의 대기 중 미세먼지 및 중금속 농도에 관한 연구에서 광양지역의 미세먼지($PM_{2.5}$, PM_{10})에는 POSCO 광양제철, 광양공단에서 배출되는 입자상 오염물질 중에 다량의 중금속(Cd, Cr, As, Pb)이 포함되어 있다고 기술하고 있다.

PM_{10} 은 대부분의 지역에서 1990년말까지 큰 감소폭을 보이다가 2000년 이후에는 낮은 감소 추세를 보이고 있다. 이미 상당히 높은 PM_{10} 수준을 보이는 포천, 평택, 당진, 서산, 동탄, 천안지역에서 2000년부터 다시 두드러진 증가 추세를 보이고 있다. 전국 대부분의 지역에서 NO_2 는 낮은 수준이기는 하지만 감소 추세를 보이며, 중부, 호남, 영남의 교외지역은 2000년 이후에 정체되거나 미약한 증가 추세를 보이고 있다⁸⁾.

전남지역의 미세먼지로 인한 대기오염의 원인과 정도를 파악하고 그에 대한 저감대책 수립 및 배출원 규제를 위해서는 사전에 오염원에 대한 정량·정성분석이 선행되어야 하며, 이들 각 발생원에 대한 오염 기여도의 평가가 무엇보다도 중요하게 인식되고 있다.

따라서, 본 연구는 다량의 배출원과 복잡한 지형으로 형성된 동부지역과 조선산업이 발달된 서부지역의 미세먼지 메커니즘을 규

명하고, 황사발생일 및 고농도 미세먼지(80 p pb 이상)가 출현하는 특정일에 대한 측정소 별 출현빈도를 조사하여 이를 기반으로 전남 동부지역과 서부지역의 고농도 미세먼지 생성에 대해 고찰하였다.

2. 대상지역 및 분석자료

2.1. 대상지역

전라남도는 대한민국의 서남부에 위치하고 있으며, 광주광역시를 둘러싸고 서쪽으로 서해에 면하고, 북쪽으로 전라북도, 동쪽으로는 소백산맥의 지리산과 섬진강을 경계로 경상남도, 남쪽으로는 남해를 경계로 제주특별자치도가 있다. 도청 소재지는 무안군 삼향읍의 남악신도시이며, 22개 시군으로 구성되어 있다.



Fig. 1. Air quality monitoring stations in Jeollanam-do

또한 전남 동부지역은 광양공단, POSCO 광양제철, 여수중화화학공단, 그리고 서부지역에는 조선산업이 발달되어 미세먼지를 비롯한 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 휘발성 유기화합물(VOCs)의 대기오염물질이 타 지역에 비해 다량으로 배출되고 있다. 이로 인해 고농도 미세먼지의 출현빈도가 높고, 미세먼지 성분도 복잡하게 구성되는 지역적인 특징

이 있다. 전남지역의 대기질을 측정하고 관리하기 위해서 전남도에서는 22개 시군에 28개 측정소를 설치하여 실시간으로 대기질 정보를 도민들에게 24시간 제공하고 있다.

Fig. 1은 연구대상지역과 대기질 상시관측소인 서부지역의 목포시 부흥동, 영광군 나불리 및 동부지역의 광양시 진상면, 광양읍 측정소를 각각 나타내고 있다.

2.2. 측정자료

본 연구에서 이용한 자료는 최근 4년간(2015~2018) 측정된 시간별 대기질 자료이며, 연평균, 월평균, 일평균 등으로 농도특성을 분석하였다. 분석에 사용한 자료는 유효측정값의 처리비율 1일 20시간(80%) 이상 존재한 자료를 유용한 자료로 판단하여 활용하였으며, 기온, 상대습도, 풍향, 풍속 등을 분석하였다. 4년간의 대상일 중 일 누적강수량 5.0 mm 이상 발생일은 분석에서 제외하였다. 강우 발생 일에는 대기오염물질의 세정작용이 우세하여 초기강우 이후에는 대기 중 미세먼지 농도가 현저히 낮게 나타나는 특징이 있다. 따라서 본 연구에서는 초기 강우량을 5.0 mm로 설정하였으며, 일 누적강수량이 초기강우량인 5.0 mm 이상으로 발생한 날은 대상일에서 제외하였다.

또한, 우리나라의 미세먼지농도는 계절별 기단의 위치에 따라 중국과 몽골로부터 유입되는 황사에 의해 많은 영향을 받고 있다. 특히 봄철, 가을철의 고농도 미세먼지는 대부분이 황사의 영향이라고 할 수 있을 정도이다⁹⁾.

그러나, 본 연구와 같이 특정지역의 미세먼지에 대한 연구를 할 경우에는 황사의 영향이 있는 경우와 없는 경우를 분리해서 자료를 분석하여 기술하였다.

Table 1은 최근 4년간(2015년~2018년) 전남 서부와 동부지역의 황사 발생 일을 나타낸 것이며, 서부는 25일, 동부는 18일 발생하였다¹⁰⁾.

Table 1. Yellow dust occurrence day in Jeonnam Area for Four years from 2014 to 2018.

Year		Yellow dust occurrence day	Total
2015	WA	2.22-23, 3.1-2, 3.21-22, 10.27	7
	EA	2.22-23, 3.1-2, 3.21-22	6
2016	WA	4.9-10, 4.23-24, 5.7, 11.27-28	7
	EA	4.9, 4.23-25, 5.7	5
2017	WA	4.19, 5.6-8, 11.8, 11.22	6
	EA	5.6-9	4
2018	WA	4.6, 4.15, 11.28-30	5
	EA	4.15, 11.28, 11.30	3

2015, 2016년에 서부지역에서 7일간 발생하여 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 2018년에 동부지역에서 3일간 발생하여 가장 적은 날의 황사가 관측되었다. 대부분의 황사는 3~5월, 11월에 관측되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 일반적인 특징

3.1.1. 미세먼지 연변화 특성

Table 2는 전남서부와 동부지역의 황사 발생일의 측정소별 PM₁₀, PM_{2.5} 농도의 연변화를 각각 나타낸 것이다. 황사가 유입된 PM₁₀의 연변화를 보면, 2015년 서부지역 나불리에서 54.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 연간 국가대기환경 기준인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고 있으며, 배출원이 집중된 동부지역보다 서부지역의 농도가 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한 PM_{2.5}는 나불리에서 2015년에 33.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고, 연간국가대기환경 기준인 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 측정소는 2015년, 2016년에 나불리, 그리고 동부지역 진상에서도 2015에 초과하였다.

Table 3은 황사가 발생한 날을 제외한 날의 측정소별 PM₁₀, PM_{2.5}의 평균값을 연도별로 나타낸 것이다. 2015년 서부지역 나불리에서 52.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 연간 국가대기환경 기준

Table 2. Annual mean PM₁₀ and PM_{2.5} concentration from 2015 to 2018.

		($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		2015	2016	2017	2018
BH	PM ₁₀	43.8	42.3	42.6	41.8
	PM _{2.5}	28.8	23.3	21.7	19.8
NB	PM ₁₀	54.0	43.9	43.6	40.8
	PM _{2.5}	33.5	30.3	25.8	25.8
JS	PM ₁₀	48.6	43.3	42.7	45.5
	PM _{2.5}	30.1	28.7	27.6	28.1
GY	PM ₁₀	38.8	36.9	36.9	32.5
	PM _{2.5}	25.8	23.4	23.4	19.0

Table 3. Annual mean concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} when there was no yellow dust.

		($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		2015	2016	2017	2018
BH	PM ₁₀	42.0	40.9	40.4	40.0
	PM _{2.5}	28.2	23.1	20.5	19.5
NB	PM ₁₀	52.3	42.8	41.2	39.8
	PM _{2.5}	33.0	30.0	25.5	25.6
JS	PM ₁₀	47.6	43.2	43.6	44.4
	PM _{2.5}	29.9	27.8	25.6	27.8
GY	PM ₁₀	37.7	36.1	35.6	31.4
	PM _{2.5}	25.5	23.2	20.0	18.8

인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고 있으며, PM_{2.5}도 나불리에서 2015년, 2016년에 33.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연간국가대기환경 기준인 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고 있다.

Fig. 2는 황사가 유입된 날과 유입되지 않은 날의 PM₁₀의 평균값을 연도별로 나타낸 것이다. 2015년도에 황사일과 비황사일을 평균한 PM₁₀의 차이는 1.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 가장 높고, 2017년도에 0.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮게 나타나고 있다.

Fig. 3은 황사가 유입된 날과 유입되지 않은 날의 PM_{2.5} 평균값을 연도별로 나타낸 것이다. 2015년도에 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2016년도에 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2017년도에 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2018년도에 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 농도가 황사에 의해 전남지역의 대기질을 악화시키고 있다. 중국과 몽골에서 계절풍을 따라 유입되는 황사는 인위적으로 저감할 수 없는 사항이므로 환경기준달성여부를 판

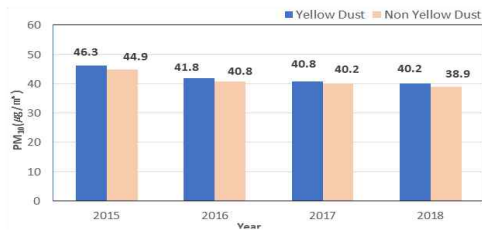


Fig. 2. Annual mean PM₁₀ concentration between the days with and without yellow dust.

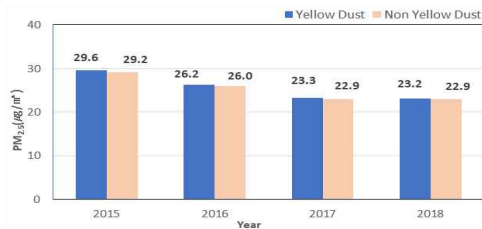


Fig. 3. Annual mean PM_{2.5} concentration between the days with and without yellow dust.

단할 때 황사 발생일을 제외하자는 의견도 제시되고 있는 실정이다.

Fig. 4는 각 측정소에서의 연도별 PM₁₀농도 변화를 나타낸 것이며, 2015년부터 점점 농도가 낮아지고 있으나, 동부 진상에서는 증가하는 경향을 보이고 있다. 서부지역의 나불리에서 높은 농도분포를 나타내고 있으며, 발생원과 비교적 먼 거리에 위치한 진상에서 평균값 이상의 농도분포를 나타내고 있다. 이는 기상적인 원인과 지형적인 원인에 기인한 것으로 사료되며, 기상과 지형조건을 고려한 예측모델을 통해 메카니즘을 규명할 필요가 있다.

Fig. 5는 각 측정소에서의 연도별 PM_{2.5}농도 변화를 나타낸 것이며, PM₁₀농도의 변화와 유사한 경향을 보이고 있으며, 나불리와 진상에서 높은 농도분포를 나타내고 있다. 또한 Fig. 5는 각 측정소의 연도별 PM_{2.5}/PM₁₀농도 비율을 나타낸 것이며, PM_{2.5}농도가 연평균 57.7~64.1%이며, 나불리와 진상에서 높게 나타나는 특징이 있다. 나불리의 경우는 조선도 정과정에서 배출되는 VOCs의 영향으로, 진상

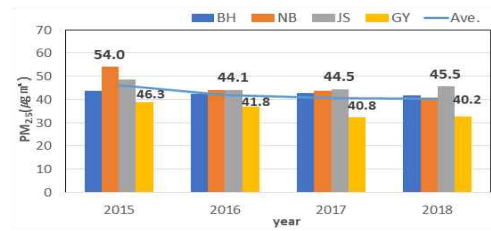


Fig. 4. Annual PM₁₀ concentration change in different measuring stations.

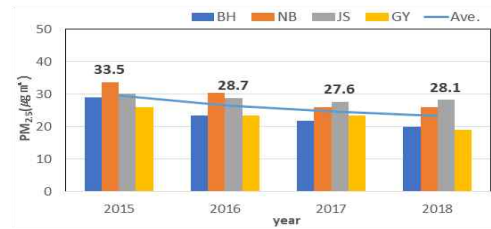


Fig. 5. Annual PM_{2.5} concentration change in different measuring stations.

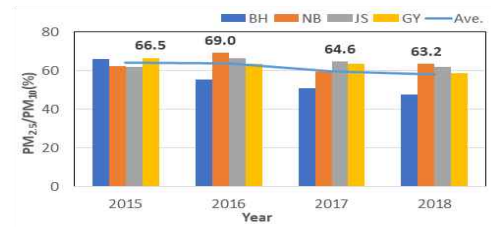


Fig. 6. Annual PM_{2.5}/PM₁₀ ratio in different measuring stations.

의 경우는 광화학반응에서 생성되는 2차 미세먼지에 기인한 것으로 사료된다.

3.1.2. 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 계절별 특성

Fig. 7은 전남지역의 측정소별 미세먼지(PM₁₀)의 계절변화(봄 3~5월 : 여름 6~8월 : 가을 9~11월 : 겨울 12~2월)를 나타낸 것이다. 봄철 (51.0 μg/m³)이의 농도가 가장 높고, 겨울철(46.1 μg/m³), 가을(37.3 μg/m³), 여름철 (35.6 μg/m³) 순으로 나타나고 있다. 봄철, 겨울철은 외부에서 유입되는 황사의 영향으로 높은 농도를 나타내고, 여름, 가을은 비슷한 농도분포를 나타내었다. 봄철은 나불리>진

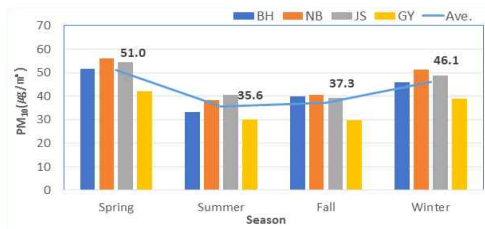


Fig. 7. Seasonal PM_{10} concentration measured in different stations.

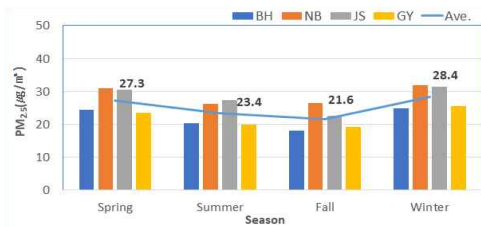


Fig. 8. Seasonal $PM_{2.5}$ concentration measured in different stations.

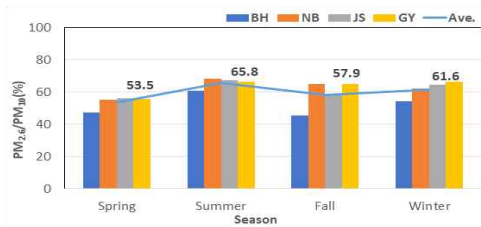


Fig. 9. Seasonal $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio in different stations.

상>부흥동>광양읍 순이었으며, 여름철은 진상>나불리>부흥동>광양읍, 가을철은 나불리>부흥동>진상>광양읍, 그리고 겨울철은 나불리>진상>부흥동>광양읍 순으로 나타났다.

Fig. 8은 전남지역의 측정소별 초미세먼지 ($PM_{2.5}$) 농도의 계절변화를 나타낸 것이며, 겨울철에 가장 높고, 봄철, 여름철 가을철 순이며, PM_{10} 의 농도분포와 다소 차이를 나타내고 있다. PM_{10} 의 경우에는 봄철이 가장 높고, 여름철이 낮은 반면 $PM_{2.5}$ 는 겨울철이 가장 높고, 가을철이 낮은 경향을 보이고 있다.

Fig. 9는 전남지역의 측정소별 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 의 비율을 나타낸 것이며, 여름철에 $PM_{2.5}$ 비

중이 65.8%로 가장 높고, 봄철이 53.5%로 낮게 나타나고 있다.

특히, 나불리와 진상은 계절에 따라 약간의 차이는 있으나 유사한 비율이 나타나고 있으며, 부흥동에서는 PM_{10} 비중 높게 나타나는 특징을 보이고 있다.

진상은 광양공단, 광양 POSCO, 광양항 선박에서 배출되는 황산화물, 질소산화물, 휘발성유기화합물 등이 배출되는 배후지역으로 광화학반응에 의해 생성된 2차 미세먼지, 풍향풍속에 따른 기상학적인 요인에 의해 봄철과 여름철의 초미세먼지 농도가 높게 나타나는 것으로 예측되며, 나불리는 조선도정과정에서 배출되는 VOSC에 기인한 것으로 사료된다.

3.1.3. 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 월변화 특성

Fig. 10은 황사 발생일을 포함한 전남지역의 측정소별 PM_{10} 월변화를 나타낸 것이며, 4월에 $53.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고, 다음으로 3월이 $51.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 8월이 $32.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 9월이 $30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 평균농도를 나타내고 있다. 측정소별로는 나불리에서 1월에 가장 높은 농도분포를 나타내고 있으며, 나불리와 진상에서 월별 농도와 변화패턴이 유사하게 나타나고 있다. 3월, 4월, 5월의 봄철은 황사에 의한 영향과 대기정체의 기상학적인 원인에 의해 높은 농도를 나타내고, 8월, 9월은 강수에 의한 세정작용과 대기 불안정으로 먼지가 많이 확산되기 때문이라고 사료된다.

Fig. 11은 전남지역의 측정소별 $PM_{2.5}$ 월변화를 나타낸 것이며, 4월에 $31.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고, 다음으로 1월이 $29.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 8월이 $21.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 9월이 $19.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 평균농도를 나타내고 있다. 측정소별로는 나불리에서 3월에 $35.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내고 진상에서 9월에 $16.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도가 나타나고 있다.

3.1.4. 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 일변화 특성

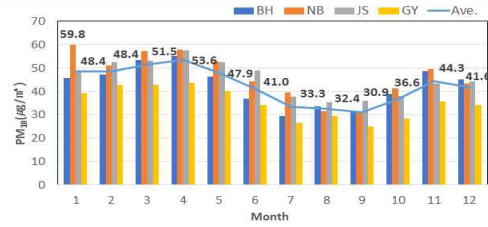


Fig. 10. Monthly PM₁₀ concentration measured in different stations.

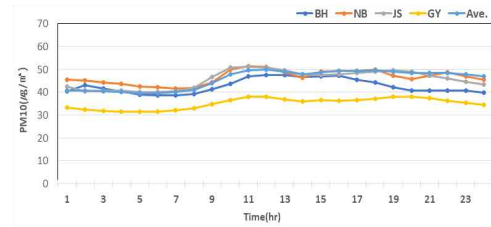


Fig. 12. Daily PM₁₀ concentration change in different stations.

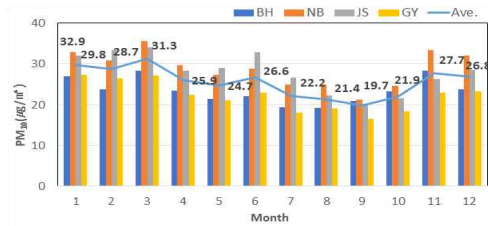


Fig. 11. Monthly PM_{2.5} concentration measured in different stations.

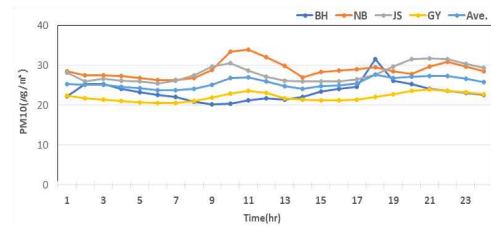


Fig. 13. Daily PM_{2.5} concentration change in different stations.

Fig. 12는 전남지역의 4개 측정소의PM₁₀의 일변화를 나타낸 것이다. 일변화 경향은 큰 차이를 보이지는 않으나, 8시부터 증가하기 시작하여 11시에 일중 최고농도가 되고, 점점 감소하다 15시부터 일정하게 농도가 유지되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 13은 전남지역의 4개 측정소의PM_{2.5}의 일변화를 나타낸 것이며, 일변화 경향은 큰 차이를 보이지는 않으나, 8시부터 증가하기 시작하여 11시에 일중 최고농도가 되고, 점점 감소하다 18시부터 다시 증가하고 20시부터 다시 감소하는 경향을 보이고 있다.

발생 특징

3.2.1. 고농도 미세먼지 발생일

미세먼지(PM₁₀)에 대한 환경부 24시간 대기 환경기준을 토대로 일평균 100 μg/m³을 초과한 날을 고농도 발생일로 산정하는 것이 일

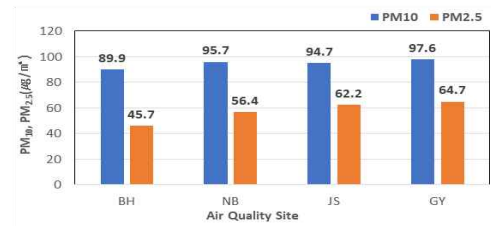


Fig. 14 Mean daily concentration of PM_{2.5} when PM₁₀ was high.

3.2. 고농도 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의

Table 4. Number of days with high concentration of PM₁₀ and without yellow dust.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
BH	9	3	8	3	2	1	0	0	0	4	1	8	39
NB	12	11	11	8	1	3	1	0	0	5	2	8	62
JS	6	8	3	9	3	4	2	0	0	1	0	3	39
GY	1	2	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	6
Total	28	24	23	21	6	8	3	0	0	11	3	19	146

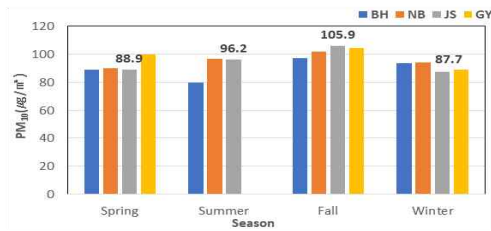


Fig. 15. Mean seasonal concentration of PM_{10} when PM_{10} was high.

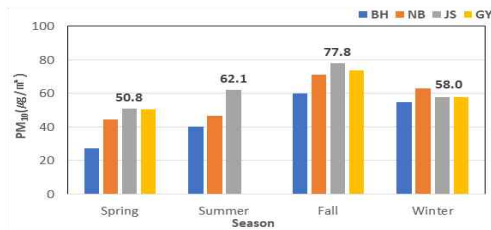


Fig. 16. Mean seasonal concentration of $PM_{2.5}$ when PM_{10} was high.

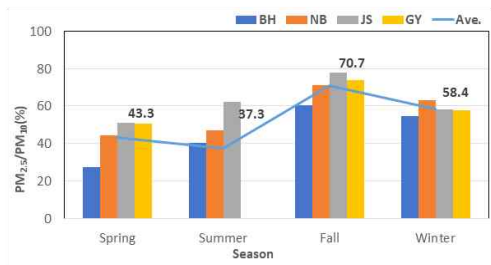


Fig. 17. Mean seasonal ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ when PM_{10} was high.

반적이나, 본 연구에서는 일평균 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과한 날을 고농도 발생일로 산정하여 분석을 실시하였다. 또한 환경부는 2018년 3월부터 미세먼지($PM_{2.5}$) 환경기준을 일평균 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 년평균농도를 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화하여 미국, 일본과 동일하게 하였다. 따라서, 본 연구에서도 PM_{10} 일평균농도의 80% 이상이 되는 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상을 고농도 발생일로 규정하여 자료를 분석하였다.

Table 4는 황사 발생일을 제외한 4년간 월별 고농도 미세먼지(PM_{10}) 발생일을 나타낸 것이며, 총 누적 초과횟수는 나불리에서 62(42.5%)회, 부흥동과 진상에서 39(26.7%)회,

광양읍에서 6(4.1%)회로 총 146회 출현하였으며, 주로 나불리에서 1월과 4월 사이에 출현빈도가 높게 나타났다. 월별로 고찰하면, 1월(28회)과 2월(24회), 3월(23회), 4월(21회), 12월(19회)로 주로 1월에서 4월 사이에 출현빈도가 높으며, 8월과 9월에는 출현빈도가 없었다. 특히, 겨울철에 70일(47.9%)이 발생하여 가장 높고, 봄철에 50일(34.2%), 그리고 여름철이 11일(7.5%)에 가장 낮은 빈도를 보이고 있다. 따라서 전남지역의 고농도 미세먼지 발생은 황사를 제외하고도 겨울철에 가장 높아, 이에 대한 관리방안이 강구되어야 할 것으로 생각된다. 겨울철 고농도 미세먼지 발생일이 황사시작 전날과 종료 다음날의 경우가 상당수 포함되어 황사의 영향에 의한 고농도 미세먼지의 출현한 것으로 사료된다.

Fig. 14는 고농도 PM_{10} 이 출현한 날에 대해 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 농도를 평균한 것이며, 광양읍에서 PM_{10} 이 $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 가 6Fig.17. Mean seasonal ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ when PM_{10} was high. $4.7 \times 97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타나고 있으나, 타 측정소 비해 출현한 날의 자료가 적어 다소 아쉬움을 남기고 있다. 대체적으로 출현한 날이 많은 측정소에서 PM_{10} 은 나불리에서 $95.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 은 진상에서 $62.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 높게 나타나고 있다.

Fig. 15, Fig. 16은 고농도 PM_{10} 이 발생일의 계절별, 측정소별 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도를 평균한 것이며, 가을철에 대체적으로 높고, 측정소는 진상과 광양읍에서 높게 나타나고 있다. 또한 $PM_{2.5}$ 농도는 봄철에 낮고, 가을철에 높은 경향을 보이고 있다. 측정소별로는 진상에서 $PM_{2.5}$ 농도가 겨울철을 제외한 모든 계절에서 높게 나타나고 있다.

Fig. 17은 고농도 발생일의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 농도 비율을 계절별, 측정소로 나타낸 것이며, 가을철에 $PM_{2.5}$ 비중이 70.7%로 가장 높고, 봄철이 37.3%로 낮게 나타나고 있다. 특히, 진상과 광양읍은 계절에 따라 약간의 농도 차이는 있으나 유사한 비율이 나타나고 있으며,

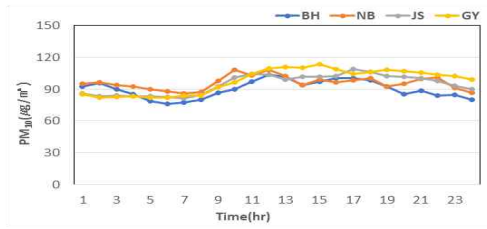


Fig. 18. Mean daily concentration change of PM₁₀ when PM₁₀ was high.

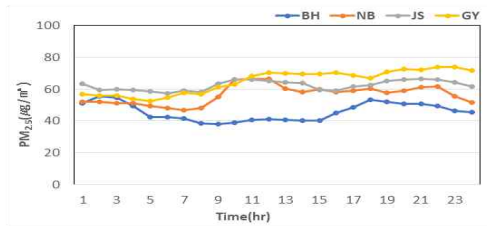


Fig. 19. Mean daily concentration change of PM_{2.5} when PM₁₀ was high.

서부지역의 부흥동, 나불리에 비해 PM_{2.5}농도 비중이 높게 나타나는 특징을 보이고 있다.

Fig. 18, Fig. 19는 고농도 PM₁₀이 출현한 날의 시간별, 측정소별 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 평균한 것이며, PM₁₀ 경우에는 9시부터 각 측정지점에서 농도가 증가하다가 14시에 최고 농도를 나타내며, 21시에 감소하는 경향을 나타내고 있다. PM_{2.5}농도도 PM₁₀농도와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 야간에도 감소하지 않고 고농도가 유지되고 있으며, 부흥동의 경우 주간시간대의 농도가 야간시간대에 비해 낮게 나타나는 특이한 변화 경향을 나타내고 있다.

3.2.2. 황사 출현일의 고농도 미세먼지의 특징

Fig. 20, Fig. 21은 황사 출현일의 연도별, 측정소별 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 평균한 것을 각각 나타낸 것이며, 연도별 PM₁₀ 평균농도(12.8 μg/m³)는 연도별로 약간 차이는 있으며, 2017년도에 118.5 μg/m³로 가장 높고, 2018년도에 104.1 μg/m³로 낮은 농도를 나타내고 있다. 측정소별로 서부지역의 부흥동과 나불리

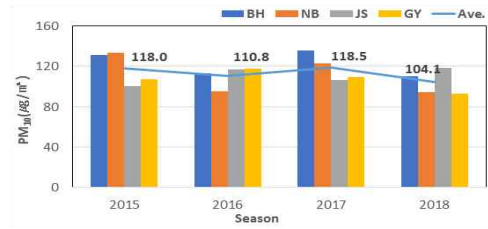


Fig. 20. Annual concentration of PM₁₀ when yellow dust occurred.

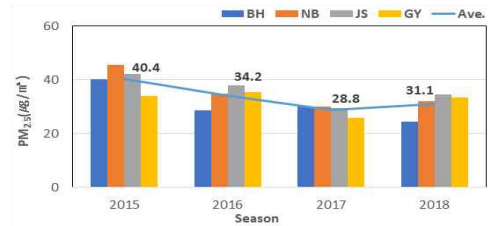


Fig. 21. Annual concentration of PM_{2.5} when yellow dust occurred.

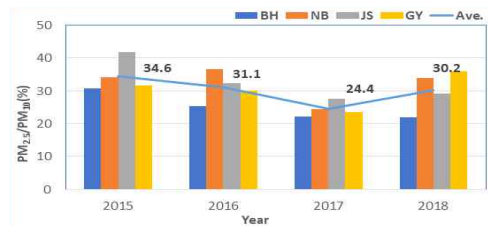


Fig. 22. Annual PM_{2.5}/PM₁₀ ratio when yellow dust occurred.

의 농도가 진상과 광양읍보다 비교적 높고, PM_{2.5} 농도는 동부지역과 비슷한 농도분포를 보이고 있다. Fig. 22는 황사 출현일의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율을 나타낸 것이며, 연도에 따라 24.4~34.6% 범위이고 가을철에 PM_{2.5}의 농도가 낮게 나타나고 있다.

앞에서 언급한 황사 출현일을 제외한 고농도 미세먼지 발생일의 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도 비율은 가을철에 70.7% 가장 높고, 여름철에 37.4%로 황사 출현일의 가장 높은 34.6%보다 높게 나타나고 있다. 이것은 황사 출현일의 미세먼지에는 1차 미세먼지 오염원의 비율이 높으나, 고농도 발생일의 초미세먼지에는 연소과정에서 배출된 질소산화물, 황산화물,

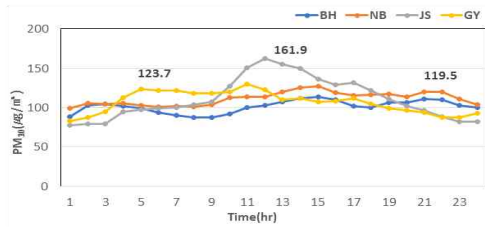


Fig. 23. Daily concentration change of PM_{10} when yellow dust occurred.

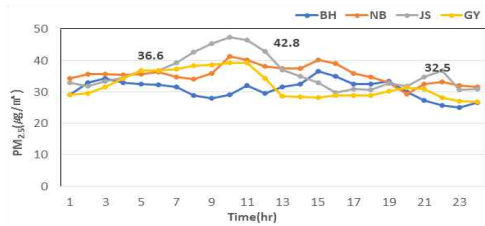


Fig. 24. Daily concentration change of $PM_{2.5}$ when yellow dust occurred

VOCs가 광화학 반응에 의해 생성된 2차 물질의 비율이 높아 $PM_{2.5}$ 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 23, Fig. 24은 황사 출현일의 시간별, 측정소별 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도를 평균한 것을 각각 나타낸 것이며, 진상을 제외한 측정소에서 주간시간대와 야간시간대의 미세먼지 농도가 시간에 관계없이 거의 일정한 수준으로 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 진상은 다량의 배출원 배후지역으로 황사와 배출원에서 배출된 미세먼지 미세먼지가 지형적인 영향으로 형성된 기류에 의해 수송된 것으로 추측된다.

3.2.3. 고농도 지속시간

전남지역의 고농도 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 생성 메커니즘을 규명하기 위하여 봄철의 지속시간에 대한 농도 패턴을 분석하였다.

Fig. 25, Fig. 26은 황사 출현일인 2016년 4월 23일과 4월 24일, 고농도 발생일인 2015년 4월 23일과 4월 24일 진상의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 시간별 농도분포를 각각 나타낸 것이다. PM_{10} 의

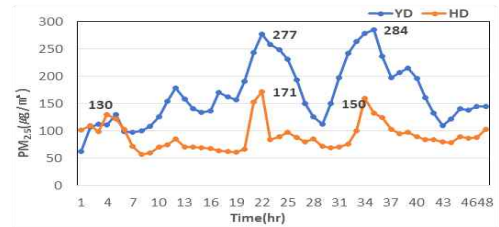


Fig. 25. Daily concentration change of PM_{10} when yellow dust occurred and there was high concentration of PM_{10} .

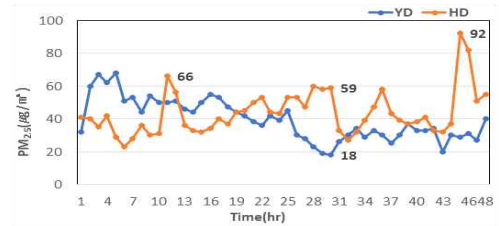


Fig. 26. Daily concentration change of $PM_{2.5}$ when yellow dust occurred and there was high concentration of PM_{10}

경우, 고농도가 발생하는 시간별 농도변화는 두 지점에서 유사하게 나타나고 있으나, 황사 출현일은 시간별 농도변화가 빠르게 증가하고 빠르게 감소하는 경향이 있으나, 고농도 발생일은 오전에 서서히 증가하다가 오후 시간대에 최고농도를 나타내고 있다. 또한 황사 발생일의 시간평균 최고농도가 $284 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 고농도 발생일의 시간평균 최고 농도가 $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 $113 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 농도 차이를 보이고 있다. 이것은 광화학반응에 의해 생성되는 초미세먼지의 최고농도의 한계를 암시하고 있다.

또한 $PM_{2.5}$ 의 경우, 황사 출현일은 첫째날에 높은 농도를 나타내면서 서서히 감소하고 있으며, PM_{10} 의 높은 농도에 비해 낮은 비율로 시간패턴을 나타내고 있다. $PM_{2.5}$ 는 오전에 서서히 증가하다가 12시에 최고점에 도달하게 되고, 감소하면서 야간에 고농도 분포를 나타내고 있다.

$PM_{2.5}/PM_{10}$ 의 농도 비율이 높게 나타나고 있으며, 광화학반응에 의해 생성된 2차 오염물질에 기인하여 고농도의 미세먼지가 출현한

것으로 추측된다. 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 피해는 농도와 노출시간에 따라 상이하게 다르므로, 오랜 시간 지속될 때를 대비하여 상응하는 긴급조치가 취할 수 있도록 미세먼지 경보 체계를 확립하는 것이 매우 중요하다.

4. 결 론

전남지역의 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 특성을 규명하기 위해 전라남도 보건환경연구원에서 운영 중인 전남지역 대기질 측정소의 최근 4(2015~2018)년간 시간별 자료를 사용하여 연도별, 월별, 시간별, 측정소별 농도 특성과 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 고농도, 황사 출현일의 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})에 대한 생성특성에 대해 고찰하였다.

1) 최근 4년간(2015년~2018년) 전남지역에 출현한 황사일은 서부지역이 25일, 동부지역은 18일이며, 2015, 2016년에 서부지역에서 7일간 발생하여 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 서부지역이 동부지역보다 발생빈도가 높고, 주로 3~5월, 11월에 관측되었다.

2) 전남지역의 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})농도의 생성특성을 알아보기 위해 황사 출현일과 비출현일로 구분하여 고찰하였다. 출현일을 분석한 결과, PM₁₀은 나불리에서 54.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 나불리(33.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 진상(30.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 연간국가대기환경 기준인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다.

3) 계절별 PM₁₀은 봄철, 겨울철, 가을철, 여름철 순으로 나타나고 있다. 봄철, 겨울철은 외부에서 유입되는 황사의 영향으로 높은 농도분포를 나타내고 있으나, PM_{2.5}는 겨울철에 가장 높고, 봄철, 여름철 가을철 순이며, PM₁₀의 농도분포와 다소 차이를 나타내고 있다. 측정소별 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율은 여름철에 PM_{2.5} 비중이 65.8%로 가장 높고, 봄철이 53.5%로 낮게 나타나고 있다.

4) 월별 농도분포는 1월부터 점차 증가하

면서측정소별 약간의 차이는 있으나, PM₁₀은 4월에 53.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고, 다음으로 3월이 51.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 8월이 32.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9월이 30.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 평균농도를 나타내고 있다. PM_{2.5}는 4월에 31.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고, 1월이 29.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 8월이 21.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9월이 19.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 평균농도를 나타내고 있다.

5) PM₁₀의 일변화는 8시부터 증가하기 시작하여 11시에 일중 최고농도가 되고, 점점 감소하다 15시부터 일정하게 농도가 유지되는 경향을 보이고 있다. 또한 PM_{2.5}는 오전에는 PM₁₀의 일변화 패턴과 유사하나, 오후 시간대에 점점 감소하다 18시부터 다시 증가하고 20시부터 다시 감소하는 경향을 보이고 있다.

4) 전남지역의 4개 측정소에서 고농도 PM₁₀이 출현한 횟수는 총 146회이며, 측정소별로는 부흥동이 39회, 나불리 62회, 진상이 39회, 그리고 광양읍 6회로, 나불리, 부흥동과 진상에서 많은 출현빈도를 나타내고 있다. 월별로는 1월(28회)과 2월(24회)에 출현빈도가 높았고, 8월과 9월에는 고농도가 발생되지 않았다.

5) 또한, PM₁₀의 시간별 농도변화는 각 측정소에서 큰 차이는 없었으며, 9시부터 각 측정지점에서 농도가 증가하다가 14시에 최고농도를 나타내며, 21시에 감소하는 경향을 나타내고 있다. PM_{2.5}도 PM₁₀농도와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 야간에도 감소하지 않고 고농도가 유지되고 있으며, 부흥동의 경우 주간시간대의 농도가 야간시간대에 비해 낮게 나타나는 특이한 변화 경향을 나타내고 있다.

6) 고농도 발생일의 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도 비율은 가을철에 PM_{2.5} 비중이 70.7%로 가장 높고, 봄철이 37.3%로 낮게 나타나고 있다. 특히, 진상과 광양읍은 계절에 따라 약간의 농도 차이는 있으나 유사한 비율이 나타나고 있으며, 서부지역의 부흥동, 나불리에 비해 PM_{2.5}농도 비중이 높게 나타나는 특징을 보이고 있다.

6) 황사 출현일의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율은 연도에 따라 24.4~34.6% 범위이고 가을철에 PM_{2.5}의

농도가 낮게 나타나고 있다. 고농도 미세먼지 발생일의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 농도 비율은 가을철에 70.7% 가장 높고, 여름철에 37.4%로 황사 출현일의 가장 높은 34.6%보다 높게 나타나고 있다. 이것은 황사 출현일의 미세먼지에는 1차 미세먼지 오염원의 비율이 높으나, 고농도 발생일의 초미세먼지에는 연소과정에서 배출된 질소산화물, 황산화물, VOCs가 광화학 반응에 의해 생성된 2차 물질의 비율이 높아 $PM_{2.5}$ 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

향후, 전남지역의 (PM_{10} , $PM_{2.5}$) 생성 메커니즘을 규명하기 위해서는 발생원별 배출량 산정, 복잡한 지형에서 형성되는 국지순환풍의 특성 파악, 전남지역의 대기질을 대표할 수 있는 측정망의 수정, 보완, 확대가 요구되며, NO_x , NO_x , VOCs, NH_3 등의 광화학반응에서 생성되는 2차 미세먼지 생성 규명과 함께 수집된 자료를 지역 특성에 적합하게 활용할 수 있는 빅데이터 분석 기술이 필요하다.

사 사

이 연구는 2019년 전남녹색환경지원센터 지원을 받아 수행된 연구입니다

참고문헌

1. 환경부, 미세먼지 관리종합대책, 관계부처 합동 자료집, 2019.
2. World Health Organization. Air pollution including WHO's 1999 guidelines for airpollution control. Geneva, World Health Organization, 2000
3. 최현정, 이화운, 임현호, 송재활, 2008, 광양만 권역에서의 고농도 오존 사례에 대한 기상 및 대기질 분석, 한국환경과학회지, 17(7), 743-753.
4. 國立環境研究所, 2006, 日本における光化学オキシダント等の挙動解明に関する研究, 國立環境研究所研究報告.
5. Kyung SY, Kim YS, Kim WJ, Park MS, Song JW, Yum H, et al. Guideline for the prevention and management of particulate matter/Asian dust particle induced adverse health effect on the patients with pulmonary diseases. Journal of the Korean Medical Association 2015;58(11) : 1060-9.
6. Ministry of Health & Welfare. Health Impacts of Air Pollution in Korea. Seoul : Korea ; 2016
7. 조태진, 정만호, 전준민, 손부순, 제철소 주변지역의 대기 중 미세먼지 및 중금속 농도에 관한 연구, 한국환경과학회지, 18-4, 401-409, 2009
8. Hwang, Y.-J., Lee, S.-J., Do, H.-S., Lee, Y.-K., Son, T.-J., Kwon, T.-G., Han, J.-W., Kang, D.-H., Kim, J.-W. (2009) The Analysis of PM_{10} Concentration and the Evaluation of Influences by Meteorological Factors in Ambient Air of Daegu Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(5), 459-471. (in Korean with English abstract)
9. 김정환 · 김영성 · 한진석 · 박승명 · 신혜정 · 이상보 · 김정수 · 이강웅, 국내 기준 성 대기오염물질의 권역별 장기 추이 및 원인 분석 : PM_{10} 과 오존을 중심으로 Journal of Korean Society for Atmospheric Environment Vol. 34, No. 1, February 2018, pp. 1-15.
10. 전병일, 황용식, 최근 5년간 부산지역의 미세먼지(PM_{10})농도 특성에 관한 연구, 환경영향평가 제16권 제6호(2007) pp.533~542.
11. 에어코리아 홈페이지, 2018, www.airkorea.or.kr/