

연구논문

호남권 대기측정소간 다중상관관계를 이용한 지역별 대기오염성분 특성 연구

오성현 · 오세호 · 배민석[†]

국립목포대학교 환경공학과

Characteristics of Atmospheric Compounds based on Regional Multicorrelation Analysis in Honam Area

Sung-Hyun Oh, Sea-Ho Oh, and Min-Suk Bae[†]

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Muan-gun Cheonggye-myeon, Jeollanam-do, 58554, Republic of Korea

Received September 23, 2022 / Revised September 28, 2022 / Accepted September 30, 2022

Particulate Matter (PM) in the atmosphere has serious impacts on human health and the global environmental systems. To reduce anthropogenic PM emissions is of importance to protect public health. In this study, the variation of concentrations in PM_{2.5}, NO₂, and O₃ of Honam region over the past 6 years (2016-2021) was investigated. A statistical approach (i.e., hierarchical cluster analysis) was performed to present their spatial relationships. As a result, the high concentration of PM_{2.5} in Iksan-si was found in sources of primary pollutants emitted from industrial complexes and ammonia from large-scale livestock complexes. The high concentration periods of PM_{2.5} with lower concentrations of NO₂ and O₃ can be seasonal and secondary PM product contributions. In addition, the concentration of O₃ in Buan-gun and Wanju-gun with lower PM levels can be the effect of emission of volatile organic compounds (VOC_S) from sources. It is necessary to strengthen management for reducing emissions by sources and to establish a policy to control precursors of the atmospheric contaminants.

Keyword: PM_{2.5}, Multicorrelation Analysis, Honam region Particulate Matter(PM)

1. 서 론

화석연료 사용이 본격적으로 시작된 18세기 산업혁명 이후 대규모 인구 증가, 산업 발전, 생활수준 향상 등을 이루었으나 대기오염물질 배출로 인한 지구환경시스템과 인체 건강에 심각한 영향을 미치고 있다. 화석연료 연소로 인한 대기오염물질 배출로 19세기 영국인의 사망률은 전 세계 평균 사망률과 비교하여 4~7배가 높다.¹⁾ 대기오염은 지역별 환경문제와 더불어 심각한 공중 보건 문제를 야기한다.²⁾ SO₂, NO_x, Volatile Organic Compounds (VOC_S)와 같은 대기오염물질 전구물질은 최종 산물인 PM_{2.5}, O₃을 형성하여 공중 보건에 악영향을 미친다.³⁾ 2015년 PM_{2.5}와 관련된 전 세계 사망률의 약 7.6%이며 전 세계

사망 위험 요소 중 5위로 보고되었다.⁴⁾ 이에 대기오염물질 배출로 인한 대기질 개선과 인체 건강에 미치는 영향에 대한 연구가 지속되고 있다. 세계 대기질 분석업체 (IQAir)에서 발표한 2019 세계대기질보고서⁵⁾에 따르면 우리나라 PM_{2.5} 연평균 농도가 24.8 μg/m³로 Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) 회원국 중 가장 높은 것으로 나타나 정부는 대기오염 저감 정책을 꾸준히 수립, 추진하고 있다.

대기오염물질 중 미세먼지는 환경문제에서 이제는 사회재난 영역으로 확대되고 있으며, 이에 대한 국민들의 관심이 높아지고 있다. 정부는 미세먼지 관리 종합계획(2020년-2024년)을 마련하여 국내 배출량 저감, 국제협력 강화, 국민건강 보호, 정책기반 마련, 국민 인식 제고 등 총 5대

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-61-450-2485, Fax: 82-61-450-2485, E-mail: minsbae@mmu.ac.kr

분야 42개 과제, 177개 세부과제로 목표를 수립하였다.⁶⁾ 2016년 대비 $PM_{2.5}$ 연평균 농도 35% 이상 저감하고 전국 $PM_{2.5}$ 연평균 농도 2016년 $26 \mu g/m^3$ 에서 2024년 $16 \mu g/m^3$ 달성을 목표로 하고 있다. 또한 미세먼지 고농도 시기인 12월부터 이듬해 3월까지 평상시보다 강화된 미세먼지 계절관리제와 고농도 미세먼지 비상저감조치도 시행하고 있다. 비상저감조치 발령기준은 (1) 당일 0~16시 평균 농도가 $50 \mu g/m^3$ 초과 및 다음날 24시간 평균 농도가 $50 \mu g/m^3$ 초과 예측, (2) 당일 0~16시 사이 해당 시도 권역 주의보 또는 경보 발령 및 다음날 24시간 평균 농도가 $50 \mu g/m^3$ 초과 예측, (3) 다음날 $75 \mu g/m^3$ 초과 예측으로 발령된다. 미세먼지 계절관리제 국민의식조사 2021년 조사에 따르면 우리나라 미세먼지 인식은 90.6%가 심각하다고 인식하고 있으며 전년 대비 0.18% 증가했다.⁷⁾ 그동안 정부의 미세먼지 관리 종합계획은 연평균 농도 저감에 목표를 두고 있다. 미세먼지 고농도 현상과 원인 파악, 문제 해결을 위한 연구가 증가하고 있다. 특히, 지역 단위의 단기적인 사례 발생에 대한 유형분석과 고농도 기간과 계절별 발생원인 분석 위주의 연구가 주를 이루고 있다.⁸⁾ 지역간 일 중 변화에 따른 대기오염물질 특성을 이해는 것은 매우 중요하다. 대기 중 미세먼지는 발생원으로부터 직접 배출되는 1차 오염물질과 1차 오염물질이 대기중에서 $PM_{2.5}$ 전구물질(NH_3 , SO_2 , NO_x , VOC_s)과 화학반응을 통해 2차 오염물질이 생성되며 고농도로 나타난다. 중국의 경우 강력한 미세먼지 저감조치로 $PM_{2.5}$ 농도는 40%까지 감소했지만 HO_2 라디칼이 오존 생성을 자극하여 다른 대기오염물질을 야기하였다.^{9,10)} 오존은 지상에서 약 15~50 km 상공의 성층권에서 생성되는 성층권 오존과 지표면에서 NO_2 의 광화학 반응에 의해 생성되는 지표 오존으로 구분할 수 있다.¹¹⁾ 성층권 오존은 태양에서 들어오는 자외선을 흡수하여 지구상의 인간과 생물을 보호하는 역할을 한다. 하지만, 대류권 오존은 고도의 산화성 대기오염물질로 주로 태양 복사가 있는 상태에서 유기 전구체 NO_x , VOC_s 의 광화학반응에서 파생되며, 많은 연구에 따르면 오존 오염은 인간의 건강을 포함하여 식물생장, 기후변화, 경제발전에 해로운 영향을 미치고 있다.¹²⁾ 대기 중 $PM_{2.5}$ 와 O_3 간의 화학적 거동은 서로 복잡하게 연결되어 있고 상반된 두 오염물질간의 상관관계가 계절마다 다르게 나타날 수 있다.¹³⁾

우리나라 호남권의 경우, 여수지역을 제외하면 대형 배출원이 없는 청정지역이다. 이에, 지역 발생 및 외부유입의 전구가스성분에 의한 2차성분이 상대적으로 높을 것으로 예상된다. 하지만, 이에 대한 상세한 과학적 분석은

진행된 바가 없다. 본 연구에서는 호남권 일반대기 측정소에서 관측된 $PM_{2.5}$ 와 NO_2 , O_3 농도의 연도별과 일 중 농도분석을 통해 다중상관관계를 분석하였다. 즉, 에어코리아에서 제공하는 최종 확정 측정자료 중 2016년 1월 1일 0시부터 2021년 8월 1일 0시까지 호남권의 대기오염 물질에 대한 농도를 활용하여, 시계열 농도 변화와 계절적근집분석 등을 이용하여 대기오염물질간의 연도별, 지역별, 시간별 상관관계 및 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대기오염측정망 장소 및 자료 처리

호남권(광주,전남,전북)의 대기오염성분 특성 연구를 파악하기 위해 통계 분석된 자료는 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하는 일반대기오염측정망 최종확정자료를 활용하였다.¹⁴⁾ 우리나라는 2004년 4월부터 한국환경공단에서 대기환경정보를 제공하기 위하여 전국 모든 측정망을 운영하고 실시간 대기오염 홈페이지를 통해 전국 162개 시군에 설치된 614개의 도시대기측정망, 국가배경농도측정망, 교외대기측정망, 도로변대기측정망, 항만대기측정망에서 측정된 SO_2 , CO , NO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$ 등 대기환경기준물질의 측정 자료를 국민들에게 실시간으로 제공하고 있다. 이 중 호남권은 도시대기 87개소, 국가배경농도 3개소, 교외대기 3개소, 도로변대기 4개소, 항만대기 4개소 등 총 101개소의 측정소가 설치, 운영되고 있다. 호남권의 2016년 1월 1일부터 2021년 8월 1일의 자료 중 1) 폐쇄된 측정소, 2) 3년 미만의 자료를 가진 측정소, 3) $PM_{2.5}$,

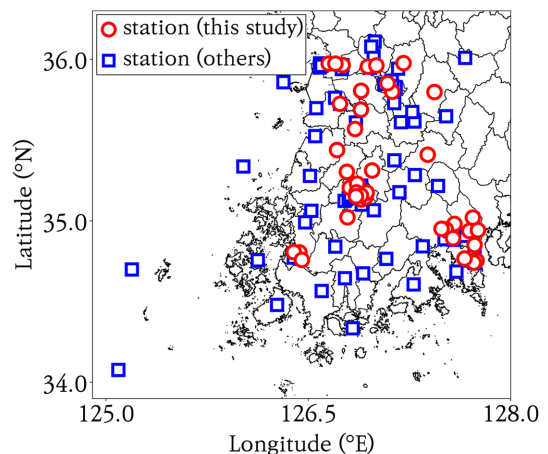


Fig. 1. Locations of air pollution monitoring station in Honam Region.

Table 1. Name of air monitoring station in Honam Region

Region	Sites
Gwangju	Oseon-dong, Seoseok-dong, Geonguk-dong, Duam-dong, Nongseong-dong, Unam-dong ¹⁾ , Chipyeong-dong ¹⁾
Jeollanam-do	Gwangyang-si(Gwangyang-eup,Jung-dong,Jinsang-myeo,Taein-dong), Naju-si, Damyang-gun, Mokpo-si(Buheung-dong,Yongdang-dong), Suncheon-si(Yeonhyang-dong,Jangcheon-dong,Hodu-ri), Yeosu-si(Deokchung-dong, Seogang-dong,Yecheon-dong,Wollae-dong), Yeongam-gun, Jangseong-gun
Jeollabuk-do	Gochang-gun, Gunsan-si(Gaejeong-dong, Soryong-dong,Sinpung-dong), Gimje-si, Namwon-si, Buan-gun, Wanju-gun, Iksan-si(Mohyeon-dong, Palbong-dong), Jeonju-si(Samcheon-dong, Palbok-dong), Jeongeup-si (Sintaein-eup,Yeonji-don), Jinan-gun

¹⁾ Road Sampling Stations

NO₂, O₃의 자료획득률이 50% 미만인 측정소를 제외하였다. 선정된 측정소는 전남 17개소, 전북 15개소, 광주 8개소로 측정소의 위치를 Fig. 1, 목록을 Table 1에 나타내었다. 다중 군집분석에는 측정소별로 평균한 일 중 변화자료가 사용되었다. 시간대별, 측정소별 다중 군집분석을 통해 지역적 군집과 시간적 특징을 동시에 나타낼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 호남권 초미세먼지 주의보 및 경보발령 현황

우리나라 국민 10명중 9명은 미세먼지로 인해 일상생

활에 불편함을 느끼고 미세먼지로 인한 경제적 비용은 연간 약 4조원의 비용이 발생한 것으로 추정되며, 이는 명목 국내총생산(Gross domestic product, GDP)의 약 0.2%에 해당하는 수준이다.¹⁵⁾ 국민들의 39%가 매일 미세먼지 예보를 확인한다는 것에 대한 관심과 우려가 높다는 것을 알 수 있다.¹⁶⁾ 이에 우리나라 초미세먼지 주의보 및 경보 발령 현황을 파악하였다(Table 2). 환경부에서는 대기오염으로 인한 국민건강 피해를 최소화하기 위해 미세먼지 농도를 1일 4회 예보를 하고 있으며, 미세먼지 실시간 농도가 건강에 위해한 수준으로 상승할 경우 해당 지역 지자체장이 주의보나 경보를 발령하도록 경보제를

Table 2. Numbers of PM_{2.5} advisories and warning in the Honam region

Type		National	Honam	Gwangju	Jeollanam-do	Jeollabuk-do	
2016	Advisories	1)	39	6	2	1	3
		2)	90	7	2	2	3
	Warning	1)	-	-	-	-	-
		2)	-	-	-	-	-
2017	Advisories	1)	42	22	12	-	10
		2)	128	13	7	-	6
	Warning	1)	1	0	-	-	-
		2)	1	0	-	-	-
2018	Advisories	1)	70	86	15	12	59
		2)	315	137	7	5	125
	Warning	1)	1	0	-	-	-
		2)	1	0	-	-	-
2019	Advisories	1)	77	82	18	9	55
		2)	590	228	8	8	212
	Warning	1)	10	14	2	2	10
		2)	52	27	1	1	25
2020	Advisories	1)	51	52	5	5	42
		2)	196	94	3	2	89
	Warning	1)	-	-	-	-	-
		2)	-	-	-	-	-

1) Number of days

2) Number of times

운영하고 있다. 초미세먼지 주의보 발령기준은 기상조건 등을 고려하여, 해당 지역의 대기자동측정소 PM_{2.5} 시간 평균농도가 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속, 경보 발령기준은 PM_{2.5} 시간평균농도가 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속 시 발령된다. 전국 초미세먼지 주의보 발령일수는 2016년 39일에서 2019년 77일로 약 2배, 발령횟수는 2016년 90건에서 2019년 590건으로 약 6.6배 정도 증가했다. 호남권의 발령일수는 2016년 6일에서 2019년 82일로 13.7배, 발령횟수는 2016년 7건에서 2019년 82건으로 11.7배 급증하여 전국 평균보다 높았다. 특히, 전북의 발령일수는 2016년 3건에서 2019년 55건으로 18.3배, 발령횟수가 2016년 3건에서 2019년 212건으로 70.7배 급증했다. 시민들의 건강과 산업 활동에 직접적으로 연관되고 있는 대기오염물질 주의보/경보 현황이 급증함에 따라 이에 따른 대책 마련이 필요하다.

3.2. 호남권 오존주의보 발령 현황

오존경보제는 대기환경보전법 제8조(대기오염에 대한 경보)에 근거하여 시행되며, 고농도 오존에 노출될 경우 피해를 입을 수 있는 민감군 및 취약군에게 오존 농도가 높음을 알리고 그 피해를 최소화하기 위해 도입되었으며 오존 경보는 시간당 오존 평균 농도에 따라 주의보, 경보, 중대경보 3단계로 나누어진다. 오존주의보는 1시간 평균 0.12 ppm 이상일때 경보를 내린다.¹⁷⁾

전국 오존주의보 발령횟수(Table 3)는 2016년 241건에서 2019년 498건으로 약 2배 정도 증가했으며 호남권은 2016년 23건에서 2019년 99건으로 4.3배 급증하였다. 전북의 경우는 2016년 18건에서 32건으로 1.8배, 전남의 경우는 23건에서 64건으로 2.8배 증가하였다. 호남권의 오존 농도 증가로 이어진 경보 발령일수 및 횟수가 증가함

에 따라 오존 농도 저감을 위한 대책 마련이 시급한 상황이다. 오존 증가원인은 지구온난화로 인한 기온 상승, 지상의 평균풍속 감소에 따른 대기혼합도가 낮아지는 기상 조건과 지상에서 발생하는 NO_x, VOC_s 배출 등에 의한 인위적인 요인이 있다. 오존은 오후 2~5시경에 강하게 발생하며, 노약자와 어린이등 취약계층에 더욱더 민감하게 반응하게 된다. 우리나라 연평균 오존농도가 지속적으로 증가할 것으로 예상할 때, 건강 영향 최소화를 위한 통합적인 교육홍보 방안과 오염물질 배출원 관리 강화, 전구 물질 생성 억제 정책을 수립해야 한다.

3.3. 호남권지역 계절별 PM_{2.5} 농도 현황

3.3.1. 봄철 농도 현황

호남권 3개 지역에서의 계절별 PM_{2.5} 농도 현황을 분석하기 위해 PM_{2.5} 평균 농도를 지역별로 나타내었다(Fig. 2). 분석결과, 봄철 PM_{2.5} 평균 농도가 가장 높은 지역은 전북 익산시로 31.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측되었다. 김제시 29.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 군산시 28.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부안군 27.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다. 전남은 영암군 26.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광주시는 26.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 호남권지역의 봄철은 초미세먼지 보통(16~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 수준으로 유지되고 있었다. 초미세먼지 환경기준 좋음(0~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 지역은 모두 전남지역으로 고흥군(14.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 보성군(15.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 화순군(15.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 완도군(14.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 나타났다. PM_{2.5} 농도가 상대적으로 높은 지역인 익산시, 김제시, 군산시, 부안군의 경우 다른 지역에 비해 지리적으로 중국 동부 공업지역과 인접해 있다. 봄에 서풍계열이 34.4%로 가장 많은 빈도를 보이고 있어 대기오염물질이 편서풍을 타고 국내로 유입되고 대기 정체로 발생한 대기오염물질이 축적되면서 2차 생성에 의해 발생하는 것으로 판단된다.¹⁸⁾ 대기 중

Table 3. Numbers of Ozone advisories in the Honam region

Type	National	Honam	Gwangju	Jeollanam-do	Jeollabuk-do	
2016	1)	55	17	17	-	
	2)	241	23	23	-	
2017	1)	59	14	14	-	
	2)	276	16	16	-	
2018	1)	66	28	18	10	
	2)	489	44	26	18	
2019	1)	60	41	1	29	11
	2)	498	99	3	64	32
2020	1)	46	24	1	19	4
	2)	293	38	1	32	5

1) Number of days

2) Number of times

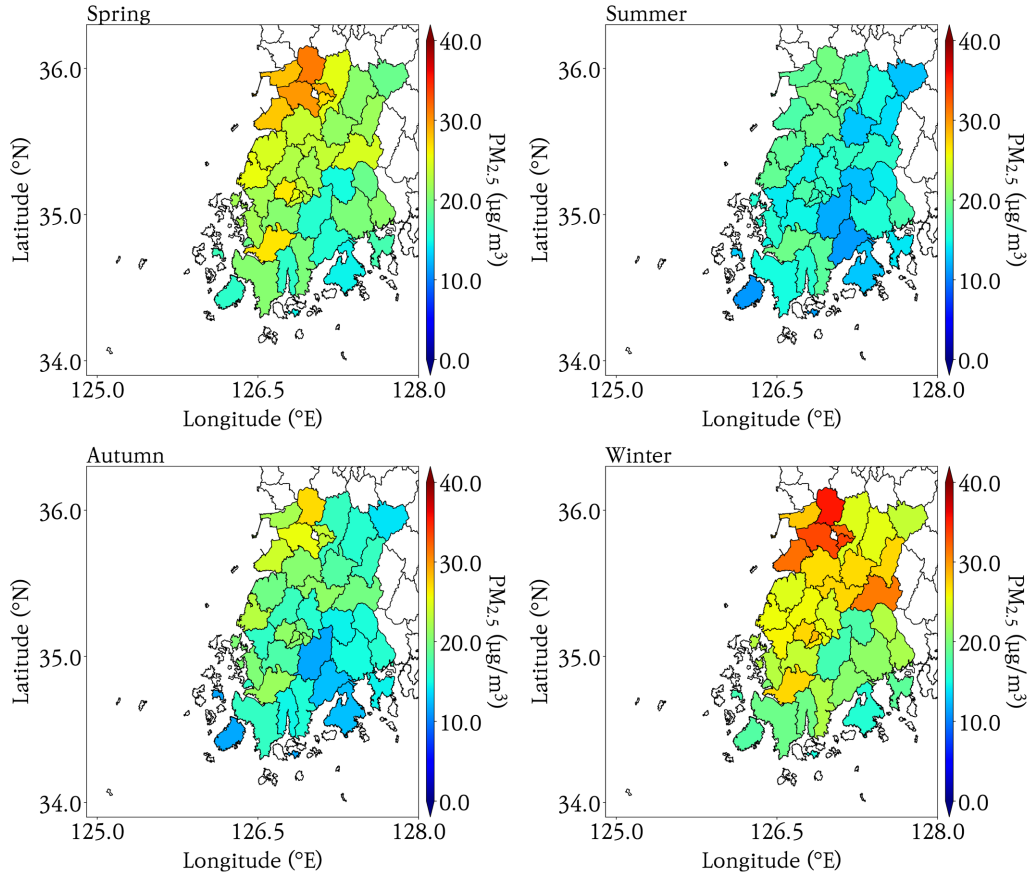


Fig 2. Seasonal and regional PM_{2.5} concentrations in Honam region.

암모니아 발생은 주로 농축산업의 가축 사육과 분뇨처리, 비료 사용과 산업시설의 생산공정 등이 주요 배출원이다. 암모니아 기체는 대기 중으로 직접 배출되어 황산화물, 질소산화물 등과 광화학반응을 통해 황산암모늄, 질산암모늄과 같은 2차 미세먼지 생성에 결정적 역할을 한다. 국내 암모니아 배출량은 농업분야가 78%, 생산공정 13%로 농축산업 분야에서 배출량이 가장 많은 것으로 나타났지만 전북의 경우는 농업에 의한 발생량 기여율이 2018년 기준 약 96% 차지했다. 전통적인 농업지역과 대규모 익산시 왕궁면 축산단지(170만m²)에서 배출되는 암모니아가 봄철 강한 자외선과의 반응을 통해 고농도 원인으로 판단된다.

3.3.2. 여름철 농도 현황

여름철 PM_{2.5} 평균 최고농도는 전주시 20.8 µg/m³, 최저농도는 전남 진도군 11.0 µg/m³로 초미세먼지 농도가 보통에서 좋음 수준으로 나타났다. 여름철에는 계절풍의

영향을 받아 남서풍 계열의 풍향이 우세함에 따라 깨끗한 공기 유입과 장마와 태풍 영향으로 인한 대기 세정 효과로 PM_{2.5} 농도가 감소하는 것으로 판단된다. 전북 군산시, 익산시, 김제시, 부안군의 경우는 다른 지역보다 여전히 PM_{2.5} 농도가 높고 봄철과 비교하면 약 10~13 µg/m³ 농도가 낮아졌다. 위 지역은 상시적으로 국내 오염물질 발생량이 높은 상태에서 외부적인 영향으로 오염도가 증가한다는 것을 알 수 있다. 전남 강진군, 고흥군, 장흥군, 광양시, 곡성군의 경우는 봄철과 여름철의 농도차이가 거의 없는 것으로(0.4~2.4 µg/m³) 나타나 외부영향보다는 지역 발생 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

3.3.3. 가을철 농도 현황

가을철 PM_{2.5} 평균 농도는 전북 익산시 27.05 µg/m³, 김제시 25.33 µg/m³, 부안군 24.05 µg/m³순으로 나타났다. 전북지역 가을철 풍향은 북쪽계열이 26.4%, 동쪽계열이 22.8%로 우세하나 풍속이 0.5 m/s 미만인 정온상태가

21.7%로 대기 정체에 의한 오염물질이 축적되고 있으며, 풍속 또한 봄철 풍속 6.1 m/s에 비해 가을철은 4.7 m/s로 가장 낮은 풍속을 보였다.¹⁸⁾ 이는 정온 상태와 낮은 풍속으로 대기오염물질이 축적되는 것으로 판단된다. 전남 대부분 지역은 PM_{2.5} 농도가 좋음 단계를 유지하고 있었다.

3.3.4. 겨울철 농도 현황

겨울철 PM_{2.5} 평균 농도는 여름철, 가을철에 비해 고농도를 보이는 지역이 증가하고 있었다. 전북 익산시 35.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 김제시 33.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부안군 31.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 전주시 33.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 남원시 31.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 나타났다. 전북지역의 겨울철 풍향은 북서쪽계열이 48.4%로 가장 많은 빈도를 보이고 있으며, 정온 상태 23.3%, 풍속은 4.8 m/s로 국외로부터 장거리 이동한 대기오염물질이 정체되어 PM_{2.5} 농도가 높아진 것으로 나타났다. 동아시아 지역의 계절별 기상패턴에 따른 우리나라 PM_{2.5} 농도 및 기여도 특성 분석에 따르면 백령도 지역의 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여도는 평균적으로 약 96.2%로 나타났으며, 광주광역시 는 55.5%로 분석하였다.¹⁹⁾ 이는 광주를 포함한 호남권 지역에 국외 기여와 지역 발생 및 전구가스 성분에 의한 2차 성분 발생 영향을 줄임과 동시에 계절, 풍향, 풍속, 강수량 등의 기상여건을 감안한 대책 마련이 필요하다.

3.4. PM_{2.5}, NO₂, O₃ 전체기간 및 고농도기간 시간대별 평균 농도 비교

호남권의 대기오염물질 측정소 40곳의 2016년 1월 1일 0시부터 2021년 8월 1일 0시까지 PM_{2.5}, NO₂, O₃의 3시간별 평균 농도를 분석하였다(Table 4). PM_{2.5} 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상을 기록하는 시간이 12시간 이상 지속되는 경우를 고농도기간으로 선정하였으며, 고농도가 발생한 날(day)의 농도를 평균, 분석하였다. NO₂, O₃은 PM_{2.5}가 고농도인 시점을 동일하게 적용하였다.

광주지역의 전체기간 PM_{2.5} 최고농도 오전 9시 ~ 12시 25.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최저농도 오후 3시 ~ 6시 19.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고농도기간 PM_{2.5} 최고농도 오전 9시 ~ 12시 61.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 전체기간과 고농도기간 모두 오전 9시 ~ 12시까지 가장 높은 농도를 나타냈으며, 오후 3시 ~ 6시까지 상대적으로 낮은 농도를 보이다가 퇴근시간 이후부터 지속적으로 농도가 증가하였다. NO₂는 전체기간 최고농도 오전 9시 ~ 12시 23.2 ppb, 최저농도 오전 3시 ~ 6시 14.8 ppb, PM_{2.5} 고농도기간 NO₂ 최고농도 오전 9시 ~ 12시 35.4 ppb로 나타났다. 전체기간과 고농도기간 모두 교통량이 많아지는 출퇴근 시간대에 높은 농도를 나타내 차량 통행에 의한 오염물질 배출에 기인한 것으로 분석된다. O₃의 경우에는 전체기간 최고농도 오후 3시 ~ 6시 42.2 ppb, 최저농도 오전 6시 ~ 9시 16.6 ppb, PM_{2.5} 고농도기간 O₃ 최고

Table 4. Overall concentrations of PM_{2.5}, NO₂, and O₃ during the entire periods and high concentration periods

Time of day	Gwangju			Jeollanam-do			Jeollabuk-do			
	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	
0-3	1)	23.4	18.4	25.0	18.9	11.9	27.6	25.7	12.7	27.1
	2)	57.7	30.6	22.2	55.4	19.5	28.2	60.8	19.4	25.3
3-6	1)	22.9	14.8	23.1	18.6	10.4	25.5	25.1	11.3	24.2
	2)	57.1	24.8	20.2	53.5	16.3	26.9	58.9	16.7	22.5
6-9	1)	22.9	21.4	16.6	18.2	14.5	21.2	24.7	14.6	20.0
	2)	56.8	31.8	13.3	51.8	21.8	21.2	57.3	20.1	17.8
9-12	1)	25.1	23.2	23.3	19.6	15.4	27.7	26.7	14.9	28.9
	2)	61.8	35.4	19.0	55.7	24.9	25.3	61.0	21.7	24.8
12-15	1)	22.1	16.3	38.9	18.6	11.5	40.0	23.5	10.3	44.1
	2)	56.7	24.2	40.0	52.3	16.8	42.4	56.7	14.7	46.3
15-18	1)	19.3	16.1	42.2	17.8	11.4	42.8	21.2	10.5	47.4
	2)	47.7	21.6	46.6	49.3	16.3	47.6	50.2	14.2	52.3
18-21	1)	20.5	22.3	33.9	18.4	14.4	36.9	22.6	14.8	39.7
	2)	51.2	31.6	36.1	52.0	21.3	40.3	53.2	21.1	41.8
21-24	1)	23.2	23.0	27.3	19.0	14.2	30.6	25.5	15.2	31.2
	2)	56.4	33.7	27.7	56.6	21.2	33.6	59.0	21.7	31.3

1) entire periods
2) high concentration periods

농도 오후 3시 ~ 6시 46.6 ppb로 나타났다. O₃ 전체기간과 고농도기간의 농도차이가 5 ppb 미만으로 고농도 현상이 오존 상승으로 이어지지 않았다. 이는 O₃ 농도 형성에 PM_{2.5} 고농도의 관여가 크지 않고 강력한 미세먼지 저감정책은 오히려 오존 생성을 촉진할 수 있다.⁹⁾

전남지역은 전체기간 PM_{2.5} 최고농도 오전 9시 ~ 12시 19.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최저농도 오전 6시 ~ 9시 18.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 나타났으며, 고농도기간 PM_{2.5} 최고농도 오후 9시 ~ 12시 56.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 광주지역과는 다르게 전남의 PM_{2.5} 고농도 기간의 일 중 시간대별 농도변화는 거의 없었다. NO₂는 전체기간 최고농도 오전 9시 ~ 12시 15.4 ppb로 나타났으며, PM_{2.5} 고농도기간 NO₂ 최고농도 오전 9시 ~ 12시 24.9 ppb, 최저농도 오후 3시 ~ 6시 16.3 ppb로 나타났다. 광주지역과 마찬가지로 PM_{2.5} 고농도의 영향이 NO₂ 농도 PM_{2.5} 고농도기간과 전체기간 평균농도를 비교했을 때 PM_{2.5} 고농도 현상이 NO₂, O₃과의 상관관계가 낮았다. 전체기간과 고농도기간 모두 교통량이 많아지는 출퇴근 시간대에 높은 농도를 나타내 차량 배출을 포함한 지역별 오염물질 배출에 기인한 것으로 분석된다. 전남지역의 O₃ 농도 상승은 광주지역과 비슷한 패턴을 보이고 고농도 현상이 O₃ 상승을 동반하지 않았다.

전북지역은 전체기간 PM_{2.5} 최고농도 오전 9시 ~ 12시 26.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최저농도 오후 3시 ~ 6시 21.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 고농도기간 PM_{2.5} 최고농도 오전 9시 ~ 12시 61.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 전체기간과 고농도기간 모두 오전 9시 ~ 12시까지 가장 높은 농도를 나타냈으며, 오후 3시 ~ 6시까지 상대적으로 낮은 농도 보이다가 퇴근시간 이후부터 배출된 오염물질 농도가 축적으로 이어지는 특성을 보였다. 전북지역 NO₂ 일 중 최고, 최저 농도차이는 광주 17 ppb, 전남 13.6 ppb 보다 낮은 10.5 ppb로 다른 지역보다 일 중 시간대별 변화가 낮았다. 이는 배출된 오염물질 확산이 낮은 것으로 나타났다. O₃의 경우에는 전체기간 최고농도 오후 3시 ~ 6시 47.4 ppb, 최저농도 오전 6시 ~ 9시 20.0 ppb, PM_{2.5} 고농도기간 O₃ 최고농도 오후 3시 ~ 6시 52.3 ppb, 최저농도 오전 6시 ~ 9시 17.8 ppb로 나타났다. 전북지역의 O₃ 농도 상승은 광주, 전남지역과 비슷한 패턴을 보이고 고농도 현상이 O₃ 상승을 동반하지 않았다. 분석결과, 광주지역은 PM_{2.5} 전체기간 오전 9시 ~ 12시 25.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고농도기간 오전 9시 ~ 12시 61.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고농도를 나타냈다. 또한, 퇴근 시간 이후 새벽까지 지속적으로 농도가 증가하고 있는 것으로 보아, 야간 높은 통행량 및 대기정체 현상이 고농도를 일으키는 원인으로 분석된다. NO₂ 농도는 출퇴근 시간대에 가장 높게 측정되어 차

량통행에 의한 농도 증가로 분석된다. 고농도 PM_{2.5}는 O₃ 농도와 높은 상관성을 나타내지 않아, 1, 2차 분진의 혼재, 외부유입 영향, 그리고 계절 및 가스상 전구성분의 영향 등 복합적인 원인으로 판단된다.

전남지역은 PM_{2.5} 전체기간 오전 9시 ~ 12시 19.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고농도기간 오후 9시 ~ 12시 56.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도를 나타냈다. 고농도 기간에 야간시간대 농도가 높은 이유는 여수 및 대불국가산업단지, 여수광양항만 등에서 배출된 1차 오염물질이 대기정체현상과 함께 축적되어 고농도를 형성하는 것으로 분석된다.

전북지역은 PM_{2.5} 전체기간 오전 9시 ~ 12시 26.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고농도기간 오전 9시 ~ 12시 61.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 전북지역은 호남권에서 가장 농도가 높고 야간시간대에도 고농도를 나타냈다. 이는, 인근의 충남신서천화력발전소, 군산 및 익산 국가산업단지 등에서 배출된 1차 오염물질과, 익산 축산단지에서 배출되는 암모니아에 의해 생성된 PM_{2.5}가 분지지형에 따른 대기정체로 고농도를 형성하는 것으로 분석된다.

호남권의 PM_{2.5} 일중 시간대별 농도는 전반적으로 오전이 높으나 야간과 새벽시간대에도 고농도를 나타냈다. 이는, 1차 오염물질 배출량 저감 대책과 2차 성분의 농도를 증가시키는 전구물질을 배출원을 분석하여, 배출억제 정책을 통해 오염물질 저감해야 한다.

3.5. 군집분석을 통한 호남권 측정소간 상관관계

호남권의 다양한 지형적 특성을 감안하고 대기오염물질과의 상관관계를 분석하기 위해 계층적군집분석 방법을 이용하였다. 계층적군집분석이란 개개의 군집들로부터 전체가 하나의 군집을 형성할 때까지 모아가는 병합적 방법이다. 즉, 실제 자료를 이용하여 매 단계마다 가장 가까운 두 군집을 하나의 군집으로 묶는다. 또한 두 개체가 한번 같은 군집에 소속되면 다시 분리되지 않는다.²⁰⁾ Fig. 3은 호남권의 다양한 지리적 여건 속에서 40개 대기오염측정소의 2016년 1월 1일 0시부터 2021년 8월 1일 0시까지 시간대별 평균 PM_{2.5}, NO₂, O₃ 농도와 상관관계를 계층적군집분석을 수행한 결과이다.

군집분석 수행 결과 PM_{2.5} 최고농도 군집을 보이고 있는 지역은 전북 익산시 팔봉동(35, 그림 중 측정소 부여번호)과 모현동(34), 김제시 요촌동(30)으로 나타났으며, 중농도지역은 전북 군산시 소룡동(28) 외 21개 지역(1,2,3,4,5,6,7,8,11,18,24,26,27,29,31,32,33,36,37,38,39), 저농도 지역은 전남 여수시 덕충동(20) 외 14개 지역 군집으로 형성되었다. 고농도를 나타낸 전북 익산시 팔봉동 61.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

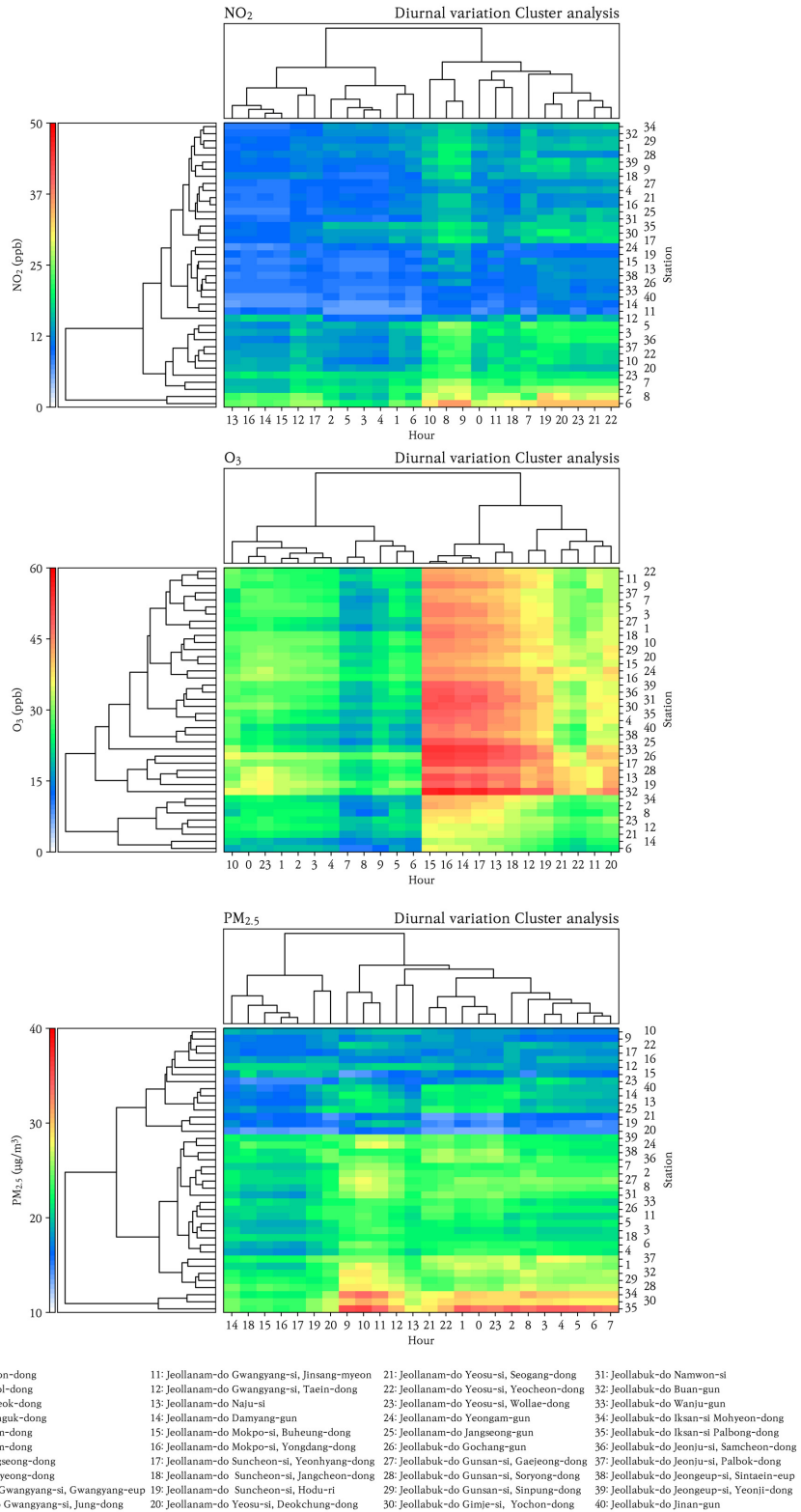


Fig. 3. Results of Multi-Cluster Analysis in Time-of-day of PM_{2.5}, NO₂, and O₃ in Honam Region.

모현동 60.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 김제시 요촌동 57.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 일평균 농도를 보였으며, 오전 0시부터 오후 12시까지 고농도의 시간대로 나타났다. 반면 오후 2시부터 오후 10시까지는 평균 농도를 나타냈으며 다른 지역의 경우도 이 시간대에 농도가 낮은 것으로 나타나 O_3 농도가 높은 시간대와의 음의 상관관계를 나타냈다. $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 가장 높게 나오는 전북 지역의 경우 2018년 $\text{PM}_{2.5}$ 배출원별 기여도를 살펴보면 비산먼지 36.4% 중 도로재비산먼지 29.7%, 축산 25.9%, 농업 19.7%, 비포장도로 10.7%를 차지하고 있으며 생물성 연소 36.4%, 비도로오염원이 18.6%로 나타났다. 전북의 미세먼지는 농축산활동, 도로재비산먼지와 농업잔재물 소각, 경유차량에 의해 배출되므로 이에 대한 저감대책이 필요하다.¹⁸⁾ 특히, 익산시 팔봉동과 모현동의 경우 밤에 높은 농도를 보이는 것은 측정소 주변 반경 3.3~3.6 km 위치에 국가산업단지와 일반산업단지가 위치해 있어 산단에서 1차 직접 배출로 농도가 높은 것으로 판단된다. 익산국가산업단지 입주업체 2022년 6월 기준, 공장 등록 업체 236개중 113개가 귀금속 및 관련제품 제조업이다.²¹⁾ 이는 금속가공제품 및 금속 열처리, 도금, 피막처리 등 제품 제조시설에서 배출되는 SO_x , NO_x , CO, VOC_s 등으로 $\text{PM}_{2.5}$ 2차 생성에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

NO_2 의 경우, 도로변 대기측정소인 광주 운암동 (6)과 치평동(8)이 고농도 군집으로 나타났다. 중농도지역은 광주 주월동(2) 외 10개 지역(3,5,7,10,12,20,22,23,36,37), 저농도지역은 전남 광양시 진상면(11) 외 26개 지역 군집으로 형성되었다. 시간대별 농도를 분석하면, 오전 7시 ~ 10시, 오후 8시 ~ 11시까지는 고농도가 나타났으며, 오전 2시 ~ 6시, 오전 11시 ~ 오후 5시까지는 평균 농도로 분석되었다. 광주지역 두 곳의 측정소는 도로변대기측정소로 출퇴근 차량 통행의 의한 농도 증가 영향으로 판단된다. 시간대별 평균농도는 출퇴근 시간대 가장 높은 농

도를 보였다. 전북 익산 모현동, 팔봉동과 김제시 요촌동은 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 지역임에도 불구하고 NO_2 농도는 저농도로 나타났다. 전북 지역의 경우 2018년 NO_2 배출원별 기여도를 살펴보면 도로이동오염원 52.6% 비도로이동오염원 19.5%, 비산업연소 8.7%, 제조업 연소가 6.0%로 나타나 이동오염원이 주요 배출원인이다.

O_3 의 경우, 광주 치평동(8), 운암동(6), 주월동(2), 여수 서강동(21), 월내동(23), 광양시 태인동(12), 담양군(14)을 제외한 모든 지역이 고농도로 나타났다. 시간대는 오후 12시부터 증가하다가 오후 3시경에 최고점에 달한 후 점차 감소하고 있었으며, 오전 0시 ~ 10시까지 가장 낮은 농도를 보였다. 대류권에서의 O_3 은 NO_x 과 VOC_s 가 햇빛에 의한 광화학 반응에 의해 생성된다. O_3 과 $\text{PM}_{2.5}$ 전구물질인 VOC_s 는 산림, 바다 등에서 배출되는 자연적 VOC_s 와 화석연료 연소, 차량 등에서 배출되는 인위적 VOC_s 로 나뉘며 매년 전구물질 배출과 기후변화에 따른 기온상승 영향으로 O_3 생성량이 증가하고 있다. 전북 부안군 56.1 ppb, 완주군 53.4 ppb, 고창군 52.5 ppb, 전남 순천시 51.8 ppb로 가장 높았다. 전반적으로 청정한 지역인 부안군, 완주군, 고창군, 순천시 등의 O_3 고농도 현상은 전구물질인 자연적으로 생성되는 VOC_s 의 영향으로 판단된다. $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 지역인 전북 익산시 팔봉동 오후 3시 48.2 ppb, 모현동 오후 3시 41.5 ppb, 김제시 요촌동 오후 4시 49.9 ppb로 여전히 O_3 농도도 높았다. 전북지역의 인위적 VOC_s 는 유기용제 사용 38.9%, 생산공정 28.1%, 폐기물처리 9.7%로 유기용제 제조시설과 사용시설에서 대부분 배출되고 있어 유기용제 제품 생산 관리기준 강화와 이동오염원에 대한 집중 관리가 필요하다.

Fig. 4는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 기준으로 고농도 지역인 익산 팔봉동, 모현동, 김제 요촌동과 저농도 지역인 여수시 덕충동, 서강동, 순천시 호두리와의 대기오염물질 농도차이와 일 중 변화를 비교 분석하기 위하여 0시부터 23시까지 시

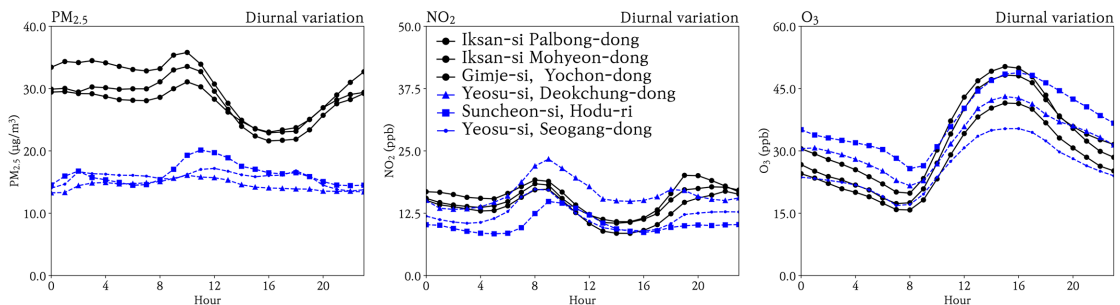


Fig. 4. Diurnal variations in $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , O_3 at high-and low-concentration regions.

간대별로 평균값을 그래프로 나타내었다. PM_{2.5}의 경우에는 대부분 시간대별로 비슷한 농도 차이의 경향을 보이나 고농도지역일수록 오후 8시 이후로 농도가 다시 올라가는 경향을 보였다. 저녁시간대에도 지속적으로 오염물질이 배출되고 대기정체와 맞물려 농도가 올라가는 것으로 판단된다. NO₂의 경우에는 PM_{2.5} 고농도 지역과 비교 대상인 저농도 지역과의 농도 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 오히려 여수시 덕충동 22 ppb 의 경우는 PM_{2.5} 농도가 낮음에도 불구하고 익산시 팔봉동 19 ppb 보다 오전 8시에 더 높게 나왔다. 여수시 덕충동의 경우 대규모 주거단지와 여객터미널이 존재하여 출근 이용차량이 많아 높은 것으로 판단된다. O₃은 PM_{2.5} 고농도지역과 저농도지역의 시간대별 농도차이가 크지 않았다. 이는 O₃ 생성 전구물질 배출량이 지역별로 꾸준히 배출되는 것으로 판단된다.

군집분석 결과, PM_{2.5} 고농도 군집을 형성하는 지역은 전북 익산시 팔봉동, 모현동, 김제시 요촌동으로 오전 0~오후 12시까지 고농도로 나타났다. 익산시 측정소 주변으로 익산국가산업단지과 쓰레기 소각장이 위치하고 있어 생산시설에서 배출된 오염물질이 익산시 축산단지에서 배출되는 암모니아에 의해 생성되어 고농도를 나타낸 것으로 판단된다.

NO₂ 고농도 군집을 형성하는 지역은 도로변 대기측정소인 광주 운암동과 치평동으로 오전 7시 ~ 10시, 오후 8시 ~ 11시까지 고농도 시간대를 나타냈다. 출퇴근 시간대에 가장 높은 농도를 나타내 차량통행에 의한 오염물질이 증가한 것으로 판단된다. 하지만, PM_{2.5} 고농도 군집을 형성하는 전북 익산시 팔봉동, 모현동, 김제시 요촌동의 NO₂ 농도는 저농도를 나타내 PM_{2.5} 고농도 현상은 NO_x 성분의 다른 전구물질 관여가 더 크다고 판단된다.

O₃ 고농도 군집을 형성하는 지역은 전북 부안군, 완주군, 전남 순천시 등으로 오후 12시부터 증가하다가 오후

3시경에 최고농도에 도달한 후 점차 감소하였다. 이는, 상대적으로 배경지역인 O₃ 농도가 높은 이유는 산림 등에서 자연적으로 배출되는 BVOCs(biological VOCs)가 O₃ 생성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 전북 익산시 팔봉동, 모현동, 김제시 요촌동은 O₃ 농도도 높게 나타나 O₃ 생성 전구물질 배출시설에 대한 집중관리가 필요하다.

호남권의 PM_{2.5}, NO₂, O₃의 고농도 특성은 측정소 주변의 오염원 배출 사업장과 지역내 전구물질 배출 영향에 따라 다양한 상관관계를 나타내었다. 지역별로 세분화된 오염물질 배출원인 분석과 전구물질 감축방안에 대한 종합적인 연구가 필요하다.

3.6. 고농도지역의 일 중 변화 비교

계층적군집분석의 상관관계를 통해 나타난 지역을 고농도 미세먼지 기간과 전체기간의 일 중 변화를 비교하여 상관관계를 분석하였다. 기존의 연구는 고농도기간과 계절별 발생원인 분석이 주를 이루었으나, 본 연구는 고농도기간에서의 일 중 변화 추이를 분석하였다. PM_{2.5} 고농도 지역으로 군집을 형성한 3개 지역(익산시 팔봉동, 모현동과 김제시 요촌동)의 고농도기간을 기준으로 전체기간 농도의 일 중 변화를 산출하고 서울, 호남과의 평균 자료로 비교 분석하였다. 서울측정소는 호남측정소와 동일한 시점(2016-2021)을 기준으로 1) 폐쇄된 측정소, 2) 3년미만의 자료를 가진 측정소, 3) PM_{2.5}, NO₂, O₃의 자료 획득률이 50% 미만인 측정소는 제외하였다.

Fig. 5는 측정소 5곳의 PM_{2.5} 일 중 농도를 시간대별로 나타냈으며, 측정소 5곳 모두 고농도기간과 전체기간은 일 중 오전 10시 시간대가 가장 높은 농도를 보였다. 고농도기간이 전체기간 일 중 시간대별 농도보다 약 2배 정도 높았으며, 시간대별 비슷한 패턴으로 농도 차이를 나타내고 있다. 고농도기간과 전체기간 모두 일 중 오후 1시부터 농도가 낮아지다가 오후 6시 이후로 높아지는 경향

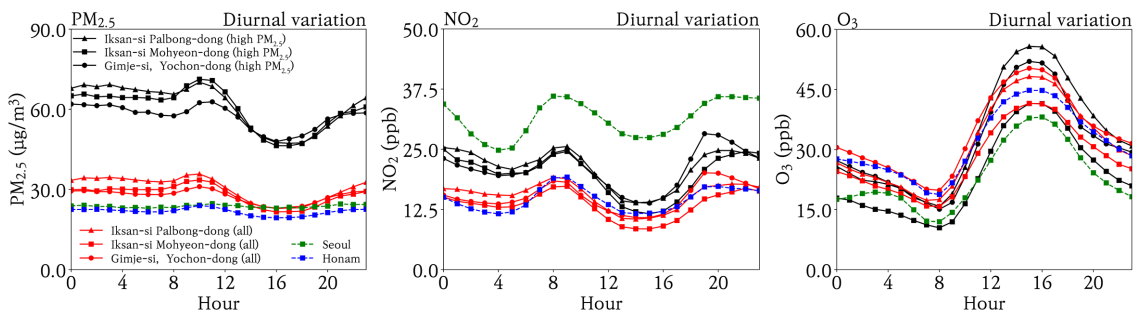


Fig. 5. Diurnal variation in PM_{2.5}, NO₂, O₃ at high concentration periods.

을 보였다. 화석연료를 사용하고 24시간 가동하는 산업 시설이 많은 지역의 경우 1차 오염물질 변화가 거의 없으며 야간은 대기현상도 정체되어 농도가 감소하지 않았다. 전북 익산시 팔봉동은 고농도 기간 오전 10시 70.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 전북 익산시 모현동 71.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 전북 김제시 요촌동 62.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 서울 평균 24.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 호남평균 24.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 매우 높은 농도를 보였다. 또한 고농도지역인 전북 3곳은 고농도기간과 전체기간 모두 시간대별 농도 추이는 비슷한 것으로 나타났다. 전북의 경우는 1차 발생원에서 배출된 오염물질이 2차 전구 성분에 의해 생성되고, 지역별 기상여건이 대기오염을 가중시키는 특성을 보였다.

PM_{2.5} 고농도 지역인 익산시 팔봉동, 모현동과 김제시 요촌동의 고농도 기간과 전체기간의 NO₂ 농도의 일 중 변화를 살펴보았다. 측정소 5곳의 NO₂ 일 중 농도를 시간대별 나타냈으며, 대체적으로 출퇴근 시간대 오전 8시 ~ 9시, 오후 7시 ~ 오전 1시까지가 가장 높은 농도를 보였다. NO₂는 고농도기간과 전체기간 일 중 시간대별 농도 차이가 약 6.7~7.3 ppb로 PM_{2.5} 농도 추이에 비하여 큰 차이는 없었다. 서울이 가장 높은 농도를 보이고 전북은

고농도기간과 전체기간 모두 시간대별 비슷한 농도차이가 나타났다. 전북 익산시 팔봉동은 고농도기간 오전 9시 25.6 ppb, 모현동 24.6 ppb, 전북 김제시 요촌동 24.9 ppb로 호남평균 19.2 ppb보다 높으나 서울 평균 35.9 ppb보다 현저히 낮음을 알 수 있으며, 전북 3곳과 호남은 대체적으로 NO₂ 농도 범위가 좋은 수준으로 나타났다. NO₂ 농도는 PM_{2.5}와 비교해보면 NO₂의 경우에는 오전 4시경에 낮은 농도를 보이지만 PM_{2.5}는 오전 4시 전후 이후 시간대에 별다른 변화가 없는 것으로 나타나 야간 배출영향과 대기 정체현상으로 판단된다. NO₂ 농도가 높은 오후 8~9시 사이에 배출된 NO₂가 오전 10시에 PM_{2.5} 고농도에 영향을 주고 오후 O₃의 농도가 높아지면서 NO₂ 농도가 낮아지는 것으로 나타나 NO₂는 O₃과 음의 상관관계가 있는 것으로 판단된다.

PM_{2.5}의 농도가 높은 지역인 익산시 팔봉동, 모현동과 김제시 요촌동의 고농도기간과 전체기간의 O₃ 농도와의 일 중 변화를 살펴보았다. 측정소 5곳의 O₃ 일 중 농도를 시간대별로 나타냈으며, 일 중 오후 3시 ~ 4시경에 최고농도를 보이고 오전 8시경에 최저농도로 나타났다. O₃

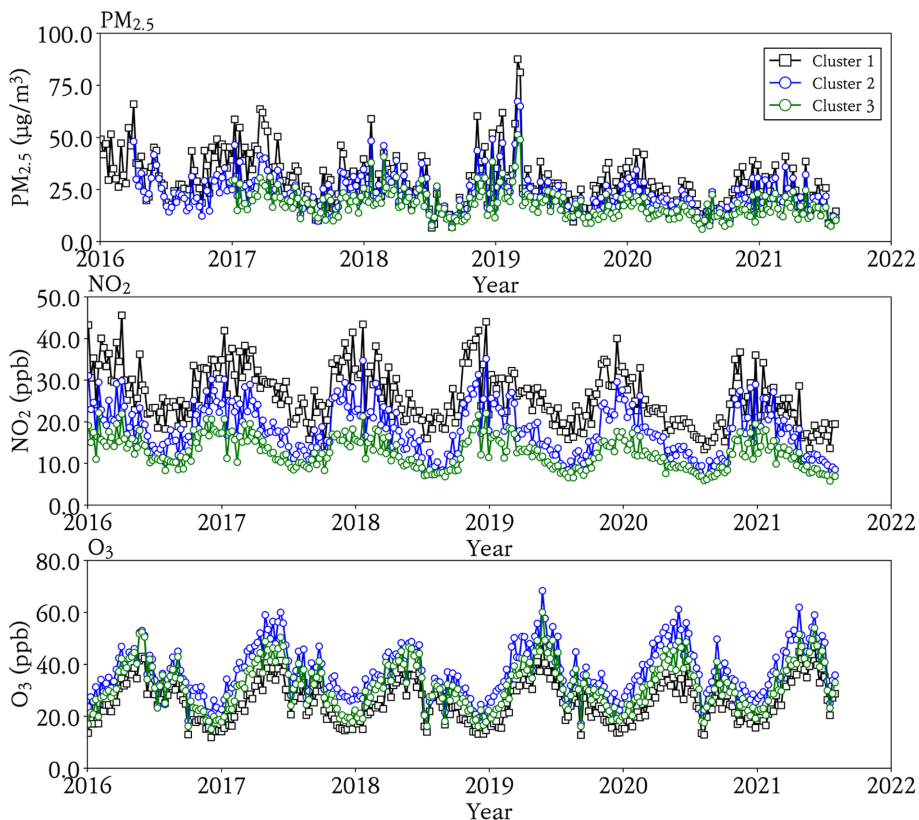


Fig. 6. Time series concentrations of PM_{2.5}, NO₂, O₃ in three clusters.

은 고농도기간과 전체기간 일 중 시간대별 농도차이가 비슷하거나 거의 없는 것으로 나타났다. 전북 익산시 팔봉동은 오후 3시 55.8 ppb, 전체기간 48.2 ppb로 약간의 차이가 있으나 익산시 모현동의 경우는 고농도기간이나 전체기간 모두 41.5 ppb로 같은 농도를 나타냈다. 서울이 가장 낮은 O₃ 농도(오후 3시 37.9 ppb)를 보이고 있으며, 호남 오후 3시 44.8 ppb보다 전북 익산시 모현동은 41.5 ppb로 낮은 농도를 보이고 있다. 분석결과, PM_{2.5} 고농도를 나타낸 전북 3개 지역은 일 중 가장 높은 시간대는 오전 10시로 나타났으며, 오후 6시 이후부터 다시 증가하였다. 이는, 산업시설의 1차 발생원에서 배출된 오염물질과 야간 축산단지에서 배출된 암모니아 및 대기정체 현상 등에 의한 복합적인 원인으로 분석된다. 전북 3개 지역의 PM_{2.5} 고농도기간의 NO₂ 농도는 출퇴근 시간에 고농도를 나타냈지만 호남 평균 농도보다 높은 이유는 도로이동오염원이 52.6%의 기여도를 나타내 도로이동오염원에 대한 적극적 관리 정책이 필요하다. PM_{2.5} 고농도기간의 O₃ 농도는 일 중 3시 ~ 4시경에 고농도를 나타냈으며, 고농도기간, 전체기간과 비교하여 일 중 농도 차이가 거의 없어 오존 생성 전구물질에 대한 전구물질 발생 원인 및 저감 대책이 마련되어야 한다.

고농도지역의 일 중 변화를 비교해보면 PM_{2.5} NO₂는 1차 발생원 오염물질을 감소가 중요하며 O₃은 전구물질 저감을 위한 정책이 필요하다.

3.7. 연도별 군집별 주평균

2016년부터 1월 1일부터 2021년 8월 1일까지 일주일 단위로 PM_{2.5}, NO₂, O₃의 연도별 농도 추이를 알아보기 위해 군집별로 시계열 농도를 분석하였다. 군집별 구성은 앞의 계층적군집분석에서 PM_{2.5} 농도를 기준으로 전체기간 시간당 평균 농도 30 µg/m³ 이상인 지역을 클러스터 1지역으로, 20 µg/m³~30 µg/m³의 농도 지역은 클러스터 2, 20 µg/m³ 이하 지역을 클러스터 3지역으로 구분하였다. PM_{2.5}의 연도별 일주일 평균을 살펴보면(Fig. 6) 고농도 지역인 클러스터 1지역(전북 익산시 팔봉동, 모현동, 김제시 요촌동)의 농도가 여전히 다른 지역보다 높으며 고농도 기간(12월~3월)에는 클러스터 1지역이 코로나-19 이전 33.9 µg/m³ 이후 28.2 µg/m³, 2지역 이전 31.4 µg/m³ 이후 23.5 µg/m³, 3지역은 이전 24.1 µg/m³ 이후 16.8 µg/m³로 나타나 코로나-19 영향으로 인한 고농도기간 PM_{2.5}는 농도가 확연히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 고농도 지역일 수록 코로나-19 이전, 이후 농도차이가 크지 않다는 것은 자체적인 오염물질 배출량이 증가하고 있는 것으로 판단된다.

NO₂의 경우는 농도가 높은 시간대의 30 ppb 이상인 지역을 클러스터 1지역으로 구분했으며, 15~30 ppb 농도 지역은 클러스터 2, 15 ppb 이하 지역을 클러스터 3지역으로 구분하였다. NO₂ 연도별 일주일 평균을 살펴보면 도로변 대기측정소가 위치한 지역인 광주시 북구 운암동, 서구 치평동(클러스터 1지역)이 가장 높은 지역으로 여름부터 가을까지 농도가 낮아지고 겨울로 들어서면서 봄까지 농도가 증가하는 경향을 보였다. 5년간의 NO₂ 농도 변화는 클러스터 1,2,3지역 모두 NO₂ 농도가 PM_{2.5}처럼 크게 감소되지 않았다. 이는 주요 배출원인 자동차 등 도로이동오염원이 증가 영향으로 판단된다.

O₃의 경우는 농도가 높은 시간대의 약 40 ppb 농도 이하의 지역을 클러스터 1지역, 40~60 ppb 지역을 클러스터 2지역, 35~45 ppb 지역을 클러스터 3지역으로 구분하였다. 클러스터 3지역 모두 매년마다 O₃ 농도가 조금씩 높아지고 있으며 코로나-19 이후 NO₂처럼 농도가 감소하지 않았다. 2020년 코로나-19 이후 PM_{2.5} 농도는 급격히 감소하였으나 NO₂와 O₃ 농도는 이전과 비슷하거나 점차 높아지는 경향을 보였다. 이는 주요 배출원인 물질에 대한 저감 관리가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 호남권 일반대기 측정소에서 관측된 PM_{2.5}와 NO₂, O₃ 농도의 연도별과 일 중 시간대별 오염농도배출량 통계 분석을 통해 시계열 농도 변화 및 계층적군집분석 등을 이용하여 대기오염물질간의 연도별, 지역별, 시간별 상관관계 및 특성을 분석하였다. 결과, PM_{2.5} 고농도 사례와 대기오염물질별 상관관계가 지역별로 상이했으며, 2차 성분 영향에 따라 고농도를 나타내는 대기오염물질이 지역별로 다르게 나타났다.

호남권 계절별 PM_{2.5} 평균농도는 겨울철 전북 익산시 35.35 µg/m³, 봄철 익산시 31.14 µg/m³, 가을철 익산시 27.05 µg/m³, 여름철 전주시 20.76 µg/m³ 순으로 전북지역이 상대적으로 높았다. 전북의 경우 전통적인 농업지역 특성과 익산시 왕궁면 축산단지에서 배출되는 암모니아 가 강한 자외선과 반응하여 고농도 사례 증가 원인으로 판단된다. 광주지역의 경우 PM_{2.5} 고농도기간 최고농도 63.5 µg/m³, 전체기간 최고농도 25.6 µg/m³로 약 2.5배 상승하였으나 NO₂ 37.8 ppb, 25.6 ppb로 1.5배, O₃ 47.5 ppb, 42.9 ppb로 1.1배로 나타났다. 계층적군집분석방법을 이용하여 호남권 지역별로 상관관계 분석을 통해 PM_{2.5} 고농도 지역은 전북 익산시 팔봉동 61.3 µg/m³, 모현동

60.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 김제시 57.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 군집을 형성하였고, 일 중 오전 0시~오후 12시 농도가 가장 높게 나타났다. 이 지역의 특성은 측정소 주변의 국가산업단지와 일반산업단지, 소각장 등에서 24시간 가동에 의한 1차 오염물질 직접 배출 영향으로 판단된다. 고농도 O_3 이 발생한 지역은 대기오염이 대체적으로 청정지역인 전북 부안군 56.1 ppb, 완주군 53.4 ppb, 고창군 52.5 ppb, 전남 순천시 51.8 ppb로 고농도를 나타냈다. 이들 지역은 산림, 바다에서 배출되는 자연적 VOC_5 에 의한 2차 성분 발생이 높을 것으로 판단된다. 낮제, 연도별 일주일 평균을 살펴보면 2020년 코로나-19 발생 이후 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 급격히 감소하였으나 NO_2 , O_3 농도는 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 또한 고농도 지역일수록 코로나-19 이전, 이후 농도 차이가 크지 않다는 것은 자체적인 오염물질 배출량이 증가하고 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 대기오염측정소의 오염농도 배출량 통계 분석을 실시하고 고농도지역의 특성과 상관관계를 연구하였다. 연구결과, 전북 익산시 팔봉동, 모현동, 김제시 요촌동 3개 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 는 오전 9시 ~ 12시 시간대 고농도를 나타냈다. 하지만 야간 시간대의 고농도 지속 현상이 나타나는 것으로 보아, 인근의 산업시설에서 직접 배출되는 1차 오염물질과, 익산 축산단지에서 배출되는 암모니아 등에 의해 생성된 $\text{PM}_{2.5}$ 가 분지지형에 따른 대기정체로 고농도를 형성하였다. 또한, 도로이동오염원이 원인에 의해 고농도 NO_2 가 호남 평균 농도보다 높게 분석되었다. O_3 농도 호남권 모두 증가하는 것으로 나타나 O_3 생성 전구물질 영향으로 분석된다.

호남권의 $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , O_3 의 고농도 특성은 측정소 주변의 오염원 배출 사업장과 지역내 전구물질 배출 영향에 따라 다양한 상관관계를 나타내었다. 지역별로 세분화된 오염물질 배출원인 분석과 전구물질 감축방안에 대한 종합적인 연구가 필요하다. 또한, 호남권의 초미세먼지와 오존주의보, 경보 발령일수 및 발령횟수가 급증하고 있는 것으로 나타나 시민들의 건강 영향 최소화를 위한 통합적인 교육 홍보 방안과 일 중 오염 시간대별에 따른 피해예방 대책 수립이 필요하다. 본 연구 결과는 호남지역의 향후 대기오염 원인 및 대책마련에 기초자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(NRF-2020R111A3054851 & NRF-2020M3G1A1115000)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김동술, “우리나라 대기오염 역사, 규제의 변천, 현행 규제체도의 개선방안”, *한국대기환경학회지*, **2013**, 29(4), 353-368.
2. A.-L. Balogun, A. Tella, L. Baloo, and N. Adebisi, “A review of the inter-correlation of climate change, air pollution and urban sustainability using novel machine learning algorithms and spatial information science”, *Urban Climate*, **2021**, 40, 100989.
3. M. Qin, A. Hu, J. Mao, X. Li, L. Sheng, J. Sun, J. Li, X. Wang, Y. Zhang, and J. Hu, “ $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 relationships affected by atmospheric oxidizing capacity in the Yangtze River Delta, China”, *Science of the Total Environment*, **2022**, 810, 152268.
4. A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett, R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, K. Balakrishnan, B. Brunekreef, L. Dandona, R. Dandona, V. Feigin, G. Freedman, B. Hubbard, A. Jobling, H. Kan, L. Knibbs, Y. Liu, R. Martin, and M. H. Forouzanfar, “Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015”, *THE LANCET*, **2017**, 389, 1907-1918.
5. IQAir, ‘2019 WORLD AIR QUALITY REPORT’, 2020, Report V8
6. 환경부 국가미세먼지정보센터, <https://www.air.go.kr>, 2022년 4월.
7. 홍중호, 이인환, 이상경 “미세먼지 계절관리제 국민인식 조사”, **2021**, 문화체육관광부.
8. 여민주, 김용표 “우리나라 미세먼지 농도 추이와 고농도 발생 현황”, *한국대기환경학회지*, **2019**, 35(2), 249-264.
9. K. Li, D. J. Jacob, H. Liao, L. Shen, Q. Zhang, and K. H. Bates, “Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **2018**, 116(2), 422-427.
10. J. Zeng, L. Zhang, C. Yao, T. Xie, L. Rao, H. Lu, X. Liu, Q. Wang, and S. Lu, “Relationships between chemical elements of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in Shanghai atmosphere based on the 1-year monitoring observation”, *Journal of Environmental Sciences*, **2020**, 95, 49-57.
11. 박현수, 김학립, 박혜영, 이보람, 최희진, 임희정, 박찬오, 박귀환, 박중수, 김득수, “평양만권 오존 발생특성 연구”, *한국대기환경학회지*, **2022**, 38(2), 118-202.
12. D. Yu, Z. Tan, K. Lu, X. Ma, X. Li, S. Chen, B. Zhu, L. Lin, Y. Li, P. Qiu, X. Yang, Y. Liu, H. Wang, L. He, X. Huang, and Y. Zhang, “An explicit study of local ozone budget and NO_x - VOC_5 sensitivity in Shenzhen China”, *Atmospheric Environment*, **2020**, 224, 1117304.
13. 이하경, 최은락, 이현지, 이수영, 이지이. “2017년 서울

- 시 O_3 과 $PM_{2.5}$ 의 계절별 상관분석 연구”, *한국대기환경학회지*, **2020**, 36(4), 533-542.
14. 에어코리아, <http://www.airkorea.or.kr>, 2022년 1월.
 15. 민지원, “미세먼지에 대한 국민 인식조사-미세먼지로 인한 경제적 비용 연간 4조 원으로 추정”, **2019**, 현대경제연구원, 833.
 16. H. G. Byun, N. Lee, and S.-S. Hwang, “A Systematic Review of Spatial and Spatio-temporal Analyses in Public Health Research in Korea”, *Journal of Preventive Medicine and Public health*, **2021**, 54(5), 301-308.
 17. 서울특별시 대기 환경정보, <https://cleanair.seoul.go.kr>, 2022년 5월.
 18. 유재연, 강기화, 남두천, 김현호, 박지영, 강현진, 김효윤, 김향미, 최정화 “2020년도 전라북도 대기질 평가 보고서”, **2020**, 전라북도보건환경연구원.
 19. 남기표, 이대균, 장임석 “동아시아 지역의 계절별 기상 패턴에 따른 우리나라 $PM_{2.5}$ 농도 및 기여도 특성분석”, *한국환경영향평가학회지*, **2019**, 28(3), 183-200.
 20. 배민석, 정창훈, 김영성, 김기현, “서울시 대기 측정소 간 상관관계를 감안한 측정소의 운용 방향 개선을 위한 제언”, *한국대기환경학회지*, **2013**, 29(4), 447-458.
 21. 전라북도 미세먼지 관리 종합계획 및 중부권 대기환경 개선 기본계획에 따른 전라북도 시행계획, 2021년 6월.