

기술자료

경상북도 대기오염물질 배출량 및 대기오염측정망 미세먼지의 농도분포 특성

Characteristics of Air Pollutant Emissions and Distribution for Particulate Matter Concentration of Air Pollution Networks in Gyeongsangbuk-do

황인조*, 이태정¹⁾, 김태오²⁾, 배귀남³⁾

대구대학교 환경공학과, ¹⁾경희대학교 환경학 및 환경공학과,

²⁾금오공과대학교 환경공학과, ³⁾한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단

InJo Hwang*, Tae-Jung Lee¹⁾, TaeOh Kim²⁾, Gwi-Nam Bae³⁾

Department of Environmental Engineering, Daegu University, Daegu, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University,

Yongin, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea

³⁾Center for Environmental Health and Welfare Research, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

접수일 2021년 4월 26일
수정일 2021년 5월 7일
채택일 2021년 5월 8일

Received 26 April 2021

Revised 7 May 2021

Accepted 8 May 2021

*Corresponding author

Tel : +82-(0)53-850-6695

E-mail : ihwang@daegu.ac.kr

Abstract The objective of this study was to estimate the emission of eight air pollutants including PM₁₀ and PM_{2.5} from 2012 to 2016, and to estimate the trends of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration using the air pollution monitoring network data in Gyeongsangbuk-do. In this study, the emission statistics provided by CAPSS were used to estimate the emissions and to analyze the emission contributions of each emission source and each air pollutant. The major emission sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in the Gyeongsangbuk-do were showed manufacturing combustion source (62% and 65%). The annual average PM₁₀ and PM_{2.5} concentration trend showed decrease gradually. The monthly average PM₁₀ and PM_{2.5} concentration trend showed a general seasonal concentration trend. The particulate matter emissions were estimated using the spatial analysis, and Pohang-si showed the highest emissions in TSP, PM₁₀, and PM_{2.5}. It is suggested that these results could be play an important role as important basic data to manage ambient air quality and establish effective emission reduction strategies in Gyeongsangbuk-do.

Key words: Emission, Source, PM₁₀, PM_{2.5}, Gyeongsangbuk-do

1. 서 론

입자상물질 (particulate matter; PM)은 해염 입자, 토양입자 등의 자연적 또는 인위적 오염원에서 직접 대기로 방출되는 1차 입자(primary aerosol)와 연소, 소각 등에 의해 인위적으로 생성된 가스상 물질이 대기 중에서 물리적, 화학적 변환과정을 통해 입자화된 2차 입자(secondary aerosol)로 나눌 수 있다. 입자상 물질은 0.005~500 μm의 크기를 가지고 있으며 오염

원의 종류에 따라 독특한 크기 범위를 가지고 있다. 일반적으로 입자상물질의 입경별 농도분포는 대략 공기 역학 직경 2.5 μm를 중심으로 쌍극 분포(bimodal distribution)를 이루고 있다고 알려져 있다(US EPA, 1999). 실제로는 대기 중으로 배출되는 입자상 오염물질은 고온 연소와 같은 작용으로 인해 3극 분포(tri-modal distribution)를 이루고 있다(Kim and Hwang, 2002).

(초)미세먼지에 대한 국민들의 관심은 2010년대부

터 급증하여 환경문제를 넘어 사회의 재앙문제로 인식되고 있다. 이러한 관심의 급증은 여러 가지 이유가 있는데 첫 번째, 그동안 미세먼지(PM₁₀) 기준만 설정하였는데 2013년에 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 대기 환경기준을 마련하고 미세먼지 예보제를 실시(MOE, 2013)한다는 정부의 발표 때문으로 판단된다. 더불어 WHO 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 미세먼지 자체를 Group I 발암물질로 분류하여(IARC, 2013) 미세먼지에 대한 국민의 관심을 증가시키는 원인이 된 것으로 판단된다. PM_{2.5}는 호흡을 통하여 폐 깊숙이 침투하여 기관지, 폐 등에 악영향을 미치며, 장기간 노출 시 면역력의 급격한 저하로 감기, 천식, 기관지염 등의 호흡기 질환은 물론 심혈관 질환, 피부 질환, 안구 질환 등 각종 질병을 유발하여 심장과 폐 관련 질환 환자의 조기 사망 등의 인체 위해성이 높다는 연구가 보고된 바 있다(Russell and Brunekreef, 2009). 또한, 가시도를 감소시키는 등 환경 측면에서 악영향을 미치고 있다(Song *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2016; Stafoggia *et al.*, 2013; Pope and Dockery, 2006). 이와 같은 이유로 미국, 유럽, 중국, 일본 등의 나라에서는 PM_{2.5}를 대기환경기준에 포함하여 관리하고 있다. 우리나라의 경우, 대기환경기준에서 PM₁₀ 기준만 설정하여 운영 중이었지만(24시간 평균 100 µg/m³, 연평균 50 µg/m³), 2015년부터 PM_{2.5}를 대기환경기준에 포함하여 EU, 일본과 마찬가지로 1차 기준농도와 2차 기준농도의 구분 없이 24시간 평균 50 µg/m³과 연평균 25 µg/m³로 기준농도를 설정하여 운영 중이었으나(Han and Kim, 2015), 미세먼지에 대한 국민들의 높아진 관심으로 PM_{2.5} 기준을 WHO나 미국 등과 같은 수준으로 강화하였다. 즉, 2018년 3월에 24시간 기준을 50에서 35 µg/m³으로, 연평균 기준을 25에서 15 µg/m³으로 강화하여 적용 중이다. 국민들은(초)미세먼지 문제가 갈수록 더 심해진다고 생각하고 있으며, 미세먼지 농도가 이전에 비해 높아졌고 고농도 발생빈도 역시 증가하였다고 느끼고 있다(Yeo and Kim, 2019). 즉, 정부의 발표 및 통계에 의하

면 미세먼지의 농도는 낮아지는 경향이지만 국민들이 느끼는 미세먼지에 대한 체감 오염도는 오히려 증가하는 추세로, 미세먼지에 대한 국민들의 불만은 점차 증가하고 있는 실정이다.

대기관리권역을 수도권에서 중부권, 동남권, 그리고 남부권으로 확대하고, 각 권역별로 대기환경 개선 목표 및 권역별 실정을 고려한 맞춤형 대책을 포함한 권역별 대기환경관리 기본계획의 수립 및 이행을 위한 시행계획의 수립 등을 주요 내용으로 하는 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법이 2020년 5월에 시행되었다. 이에 따라 각 권역에서는 대기오염에 대한 체계적인 관리와 개선을 위한 시행 세부계획을 5년마다 수립해야 하며, 매년 시행계획의 추진실적을 보고해야 한다(MOE, 2020). 여러 권역 중 동남권은 부산시, 대구시, 울산시 전역과 경상북도 및 경상남도 일부지역이 관리범위로 지정되었다. 경상북도의 경우는 대기오염물질 배출량이 크거나 대기오염도가 높은 지역인 포항시, 경주시, 구미시, 영천시, 경산시, 그리고 칠곡군 등을 관리대상지역으로 선정하였다. 경상북도는 총면적이 19,031 km²으로 남한 면적의 약 19% 정도를 차지하는 가장 면적이 넓은 지자체로서 행정구역은 23개 시, 군으로 구성되어 있다(Gyeongsangbuk-do, 2019). 경상북도는 포항과 구미 등과 같은 대규모 산업단지가 위치하여 생산활동이 활발히 이루어지고 있으며, 더불어 다양한 대기오염물질 즉, PM₁₀ 및 PM_{2.5}와 같은 입자상물질과 O₃, 악취, VOC 등과 같은 가스상오염물질의 배출량도 증가하고 있는 실정이다(Hwang and Kim, 2019). 특히, 포항의 경우는 우리나라의 대표적인 기간산업인 철강산업이 밀집되어 있는 대규모 산업단지가 위치해 있어 대기오염도가 심한 지역이다.

전술한 바와 같이 2020년에 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법이 시행되어 지방자치단체는(초)미세먼지가 국민에게 미치는 영향을 파악하고(초)미세먼지로부터 건강과 생명을 보호하기 위한 시행계획을 수립, 시행해야 한다. 이러한 노력은 국민들의 건강과 재산 손실 및 산업체의 경제적 손실을

최소화할 수 있으며, 대기오염 기초연구를 활성화하는 학문적 실용성을 동시에 충족시킬 수 있는 중요한 부분이다. 그러나 경상북도의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 경향에 대한 연구는 포항의 TSP 중 다환방향족탄화수소 및 중금속 농도분포 연구(Baek *et al.*, 2019) 및 PM_{2.5} 오염 특성 평가 연구(Baek *et al.*, 2008), 김천지역 산업단지의 PM_{2.5} 농도 특성에 관한 연구(Hwang and Kim, 2019), 포항의 PM₁₀ 자동측정망 자료를 이용한 농도분포 특성 연구(Choi and Baek, 2016), 경산지역 PM_{2.5}의 농도특성 파악 및 오염원의 기여도 추정 연구(Jeong and Hwang, 2015; Li and Hwang, 2015) 등이 수행된 바 있지만 주로 공업도시를 중심으로 일부 지역에 편중되어 연구가 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 경상북도의 PM₁₀과 PM_{2.5}을 비롯한 대기오염물질의 배출량에 대한 고찰 및 대기오염 측정망 자료를 이용한 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 경향을 분석하고자 하였다. 이러한 연구 결과는 경상북도의 대기환경관리 기본계획의 수립 및 이행 등을 위한 중요한 기초자료로 이용할 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

2.1 자료의 수집 방법

본 연구에서는 경상북도의 배출원별 그리고 대기오염물질별 배출량 확인 및 배출 기여도 분석을 위하여 8개의 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, VOCs, NH₃)을 선정, 관리하고 있는 대기정책 지원시스템(Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS)에서 제공하고 있는 배출량 통계자료를 이용하였다.

또한 경상북도의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 경향에 대한 분석을 수행하기 위하여 경상북도의 대기오염측정망 자료를 이용하였다. 연구 대상지역인 경상북도에는 1988년 구미시 공단동에 대기오염측정망이 처음 설치된 이후, 총 38개소의 도시대기측정망이 운영 중이다(2020년 6월 기준). 경상북도의 경우는 미세먼지

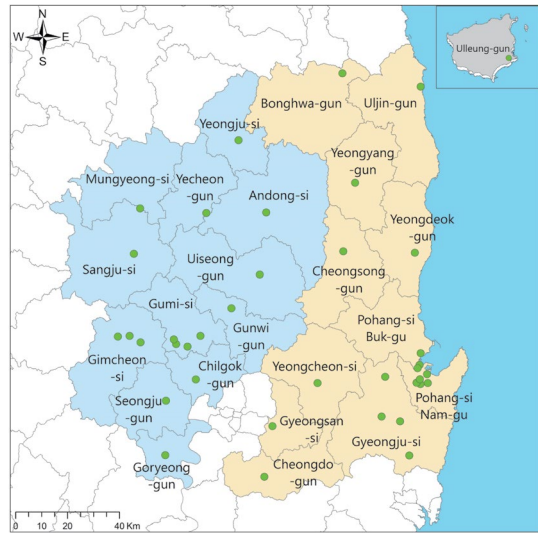


Fig. 1. Locations of the air pollution monitoring stations in the Gyeongsangbuk-do area.

관리를 위하여 23개 시·군·구를 3개의 권역(동부권역, 서부권역, 울릉권역)으로 관리하고 있다. 동부권역의 경우는 10개 시군(포항시, 경주시, 경산시, 영천시, 청도군, 청송군, 영덕군, 영양군, 봉화군, 울진군 등)의 20개 대기오염측정소에서 측정이 이루어지고 있으며, 서부권역의 경우는 12개 시군(구미시, 김천시, 안동시, 영주시, 상주시, 문경시, 예천군, 의성군, 군위군, 성주군, 고령군, 칠곡군 등)의 18개 대기오염측정소에서 측정이 이루어지고 있다(그림 1). 경상북도의 각 지자체별 측정망 설치현황의 경우, 포항시가 총 8곳의 측정망이 설치되어 가장 많은 측정망을 보유한 지자체이며, 그 다음으로는 구미시와 경주시가 각각 4곳에 측정망이 설치되어 운영 중이다. 김천시의 경우는 총 3곳에 측정망이 설치되어 운영 중이며, 안동시를 비롯한 19개의 시군에서는 1곳의 측정망이 설치되어 대기오염물질에 대한 측정이 수행되고 있다(표 1). 전술한 바와 같이 경상북도의 경우는 1988년에 처음으로 대기오염측정망이 설치되었으며 1990년대에는 7곳(18.4%)에 추가 설치되었다. 2000년대에는 총 29곳에 추가로 설치가 되었으며(76.3%) 특히, 2019년에 14곳(36.8%), 2020년에 6곳(15.8%)이

Table 1. Summary for the air pollution monitoring stations in the Gyeongsangbuk-do area.

	Station code	Station	Installation year	Coordinate	
				Longitude	Latitude
Pohang	437112	Jangheung-dong	1989	129.3748	35.9802
	437113	Jangnyang-dong	1999	129.3803	36.0707
	437114	Daedo-dong	1997	129.3658	36.0188
	437115	Daesong-myeon	2005	129.3600	35.9684
	437116	3 Gongdan	2010	129.3768	35.9631
	437117	Songdo-dong	2019	129.3756	36.0301
	437118	Ocheon-eup	2019	129.4087	35.9668
	437119	Cheongnim-dong	2019	129.4054	35.9974
Gumi	437151	Gongdan-dong	1988	128.3858	36.1019
	437152	Wonpyeong-dong	1991	128.3258	36.1308
	437153	Hyeonggok-dong	1997	128.3386	36.1108
	437154	4 Gongdan	2010	128.4394	36.1372
Gyeongju	437122	Sungeon-dong	1996	129.2076	35.8507
	437123	Bodeok-dong	2019	129.2870	35.8351
	437124	Angang-eup	2019	129.2270	35.9907
	437125	Oedong-eup	2019	129.3236	35.7157
Gimcheon	437131	Mundang-dong	1993	128.0884	36.1446
	437132	Daegwang-dong	2019	128.1372	36.1441
	437133	Yulgok-dong	2020	128.1839	36.1215
Andong	437141	Myeongnyun-dong	1995	128.7280	36.5683
Yeongju	437161	Gaheung-dong	2000	128.6132	36.8212
Gyeongsan	437171	Jungbang-dong	2012	128.7433	35.8250
Sangju	437181	Sangju-si	2017	128.1578	36.4289
Chilgok	437191	Chilgok-gun	2017	128.4185	35.9907
Yeongcheon	437402	Yeongcheon-si	2018	128.9378	35.9729
Uljin	437421	Uljin-gun	2018	129.4029	36.9972
Bonghwa	437431	Seokpo-myeon	2019	129.0653	37.0486
Ulleung	437542	Ulleung-eup	2019	130.9056	37.4841
Goryeong	437551	Daegaya-eup	2019	128.2817	35.7262
Yeongdeok	437201	Yeongdeok-eup	2019	129.3638	36.4201
Uiseong	437412	Uiseong-eup	2019	128.6970	36.3527
Gunwi	437561	Gunwi-gun	2019	128.5746	36.2379
Seongju	437221	Seongju-gun	2019	128.2901	35.9175
Yecheon	437581	Yecheon-eup	2020	128.4732	36.5768
Cheongdo	437591	Hwayang-eup	2020	128.7063	35.6498
Cheongsong	735601	Cheongsong-gun	2020	129.0564	36.4293
Yeongyang	437571	Yeongyang-gun	2020	129.1124	36.6667
Mungyeong	437211	Mungyeong-si	2020	128.1862	36.5868

집중적으로 설치되었다.

2.2 공간분포 분석(spatial analysis)

공간분포 분석은 공간과 관련된 위치정보와 속성 정보로 이루어진 공간자료(spatial data)의 주요 패턴 및 경향을 조사하고 대상지역 내에서 이 패턴과 다른 속성과의 관계들을 분석하는 것이다. 여기서 위치정보는 보통 2차원 또는 3차원의 좌표로, 속성정보는 변수(예: 농도값)로 표현된다. 즉, 공간분포 분석을 이용하면 동일시간에 지역적으로 상이한 측정 장소에서 측정한 자료를 평면상에서 시각적으로 표현이 가능하다(Ju and Hwang, 2011; Rebert and Derek, 1992). 국가에서 제공하고 있는 대기오염물질 배출량 자료는 공간적으로 행정구역별 해상도로 제공하고 있지만, 공간적 해상도를 높은 공간분포 분석은 지역의 대기오염물질 배출 특성 및 미세먼지 배출지역과 배출 특성 등을 파악하는데 실용적인 자료로 활용될 수 있다.

공간분포 분석은 주로 GIS (Geographic Information System, 지리정보체계) 프로그램을 사용하며, 본 연구에서는 ArcGIS (ArcMap ver. 10.6, ESRI, USA) 프로그램을 이용하였다. GIS는 공간을 대상으로 하는 여러 정보를 수집 및 관리하기 용이하며 사용목적에 따른 다양한 분석이 가능하다. 공간분포 분석에서 먼저 GIS 데이터를 구축해야 하는데, 이를 위해서는 대기오염물질의 배출량 자료 및 미세먼지 농도 자료가 필요하다. 각 자료는 국립환경과학원의 CAPSS 자료와 한국환경공단 에어코리아에서 제공하는 경상북도 시·군·구 연도별 미세먼지 농도를 참고하였다. 참고한 자료들을 엑셀파일로 정리한 후 ArcGIS 내의 ArcCatalog 프로그램을 사용하여 GIS 파일(shp 파일)로 변환하였다. 공간분포는 행정 구역도를 기본 데이터 베이스로 하여 ArcGIS에서 사업장 및 대기오염측정망 좌표, 행정구역 코드를 기반으로 변환된 자료를 입력하였으며, TM 지도 투영법에 따라 중부원점을 기준으로 좌표를 산정하였다. 변환된 GIS 파일은 ArcMap 프로그램에서 모식화하여 나타내며 ArcGIS

에서 제공하는 분석도구를 이용하여 공간분석을 수행한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경상북도 대기오염물질 배출

대기오염물질 배출목록 (Air Pollutants Emission Inventory)에 근거한 대기정책지원시스템(CAPSS)을 활용하여, 점·면·이동오염원 등에서 배출되는 8가지 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, NH₃)의 배출량을 매년 산정하여 대기환경개선 종합계획, 지자체 대기환경관리 시행계획 등의 근거자료 및 정책성과평가 등에 기초자료로 활용하고 있다. 배출원 분류체계는 국내 산업 분류체계와 유럽 CORINAIR 배출원 분류체계를 혼용하고 있으며, 배출원을 13개 항목의 대분류로 구분한다(NIER, 2019).

경상북도의 연도별(2012~2016년) 대기오염물질의 배출량 변화를 그림 2에 나타내었다. 경상북도의 연도별 배출량으로 가장 큰 변화는 2014년 이후 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 배출량의 증가이다. 2014년까지 CAPSS는 11개 대분류로 대기오염배출량을 산정하였지만, 2015년부터 기존의 11개 대분류에 비산먼지, 생물성 연소를 공식 배출원으로 추가하여 VOC, TSP, PM₁₀,

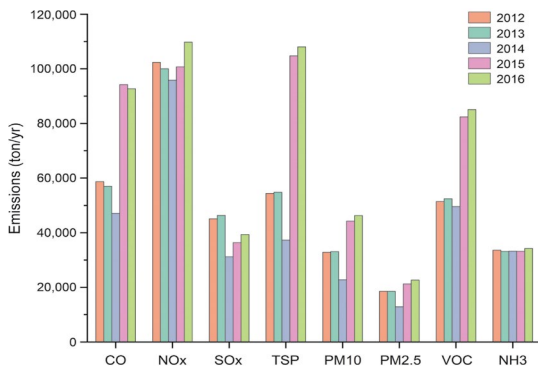


Fig. 2. Annual air pollutants emission in Gyeongsangbuk-do area.

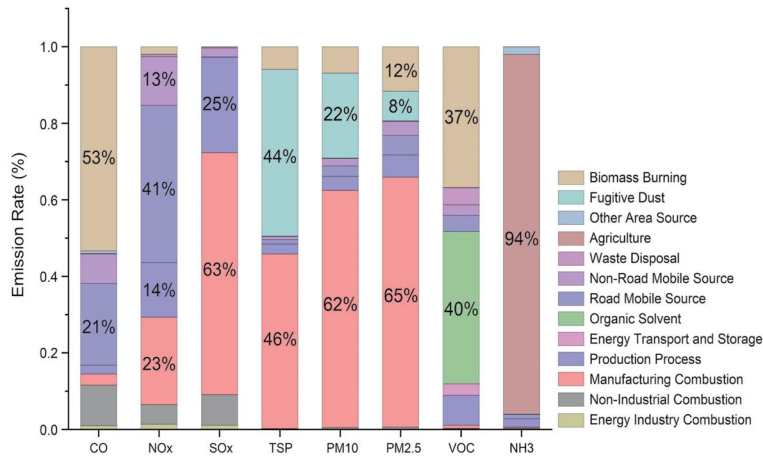


Fig. 3. The status of air pollutant emissions by emission source in Gyeongsangbuk-do area.

PM_{2.5} 배출량에 큰 변화가 있었다. 또한, 2016년 기준 경상북도의 배출원별 대기오염물질 배출 현황을 살펴보면 (그림 3), CO는 생물성 연소에서 53%, 도로·비도로이동오염원에서 21%가 배출되었으며, NO_x의 주 배출원은 도로·비도로이동오염원 각각 41%, 13%, 제조업연소 23%, 생산공정 14% 순으로 확인되었다. SO_x는 63%가 제조업 연소, 25%가 생산 공장에서 발생하였으며, TSP는 46%가 제조업 연소, 44%가 비산먼지가 두 개의 큰 배출원으로 조사되었다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 주요 배출원은 각각 제조업연소 (62%, 65%), 비산먼지 (22%, 8%), 생물성연소 (7%, 12%)로 확인되었다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 입자의 크기가 작아짐에 따라 비산먼지의 배출량 비율이 감소하였고, 제조업 연소의 배출 비율이 증가하는 것으로 판단된다. VOCs는 대부분 유기용제 사용(40%)과 에너지 수송 및 저장 (37%)에서 발생되었으며, NH₃는 94%가 농업 관련 오염원에서 배출되는 것으로 조사되었다.

2016년 기준 경상북도의 권역별 대기오염물질 배출량 현황을 그림 4에 나타내었다. 동부권역의 경우 일부 대기오염물질 (CO, VOC, NH₃)을 제외한 대부분의 대기오염물질에서 다른 권역에 비해 높은 대기오염물질 배출량을 나타내었다. 동부권역의 경우 포

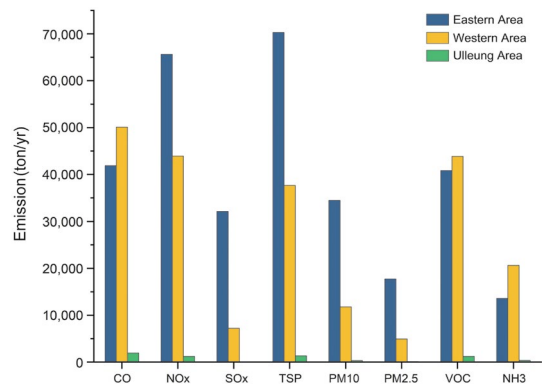


Fig. 4. Annual air pollutant emissions by three regions in Gyeongsangbuk-do area.

스코 및 제철산업과 관련된 면 오염원 및 점 오염원 (산업단지와 대형 공장 등)들이 다수 위치해 있어, 제조업 연소로부터 발생하는 여러 대기오염물질의 발생량이 상당히 큰 것으로 판단된다. 서부권역은 동부권역에 비해 제조업 연소에 의한 대기오염물질 배출량의 영향이 적은 것으로 조사되었으며 생물성 연소, 기타 면 오염원, 비산먼지 등에 의한 배출 영향을 많이 받는 것으로 확인되었다(그림 5). 울릉권역의 배출량은 동부권역과 서부권역에 비해 절대적으로 작은 것으로 조사되었다. 먼지(TSP, PM₁₀, PM_{2.5}) 발생

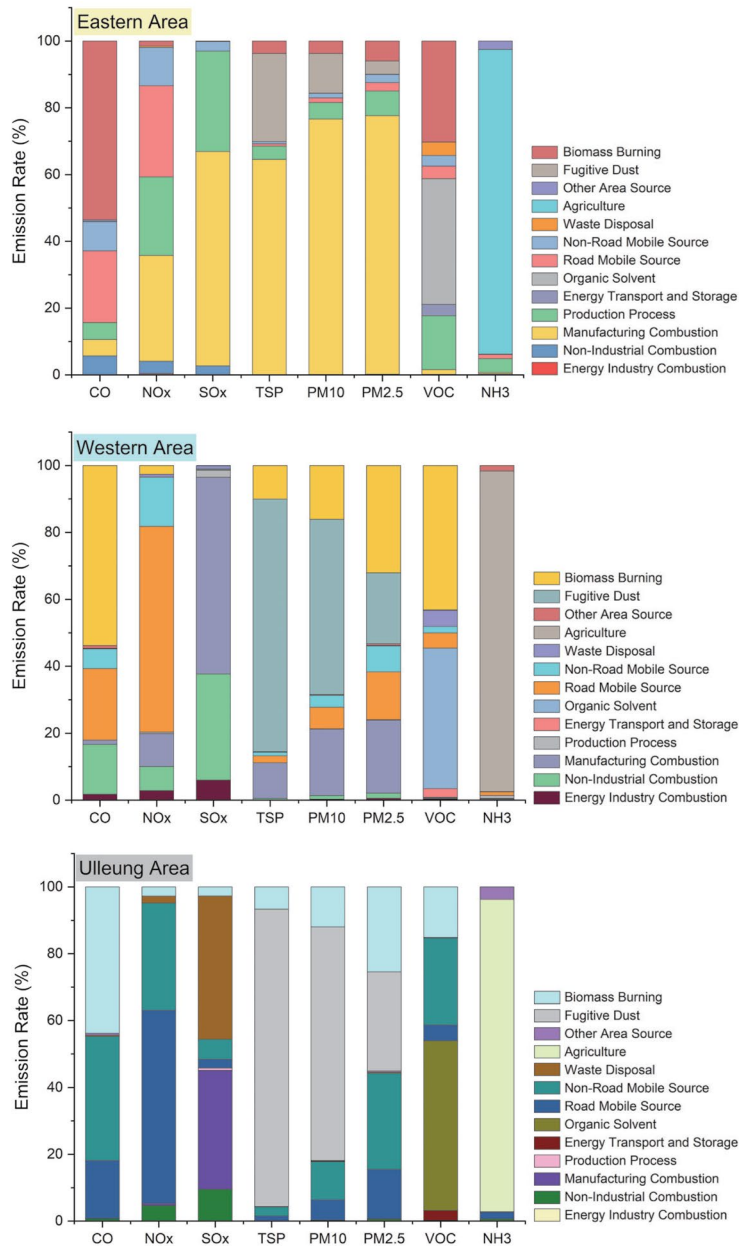


Fig. 5. The status of air pollutant emissions classified emission source by three regions in Gyeongsangbuk-do area.

량의 경우, 동부권역에서는 제조업 연소가 60~70% 이상을 차지하고 있었으며, 서부권역에서는 비산먼지, 생물성 연소, 제조업 연소 등에서 주로 배출되는 경향을 나타내었다. 울릉권역의 경우 비산먼지, 생물

성 연소, 비도로이동오염원에서 주로 PM_{2.5}를 비롯한 먼지를 배출하는 것으로 조사되었다(그림 5).

2016년 기준 경상북도 23개 시·군·구의 대기오염 물질 배출원에 대한 배출량 기여도를 분석하였으며

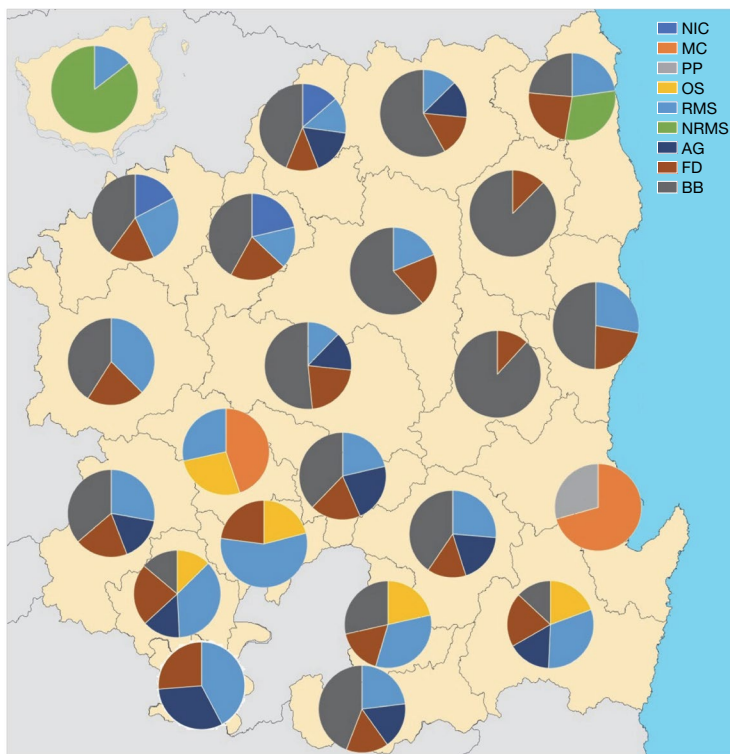


Fig. 6. Contribution of major emissions by air pollutant emission source of 23 local governments in Gyeongsangbuk-do in 2016 (NIC: non-industry combustion; MC: manufacturing combustion; PP: production process; OS: organic solvent; RMS: road mobile source; NRMS: non-road mobile source; AG: agriculture; FD: fusitive dust; BB: biomass burning).

이를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에는 각 시·군·구 배출량 기여도 중에서 높은 기여도를 차지하는 대부분 류 배출원만 표시하였다. 가장 배출량이 많은 포항시의 경우는 전체 배출량 중 57.4%가 제조업 연소에서 발생하였으며, 다음은 생산공정에서 23.8%가 발생하여 제조업 연소와 생산공정 배출량이 포항시 대기오염물질 배출량의 80% 이상을 차지하는 것으로 조사되었다. 두 번째로 높은 배출량을 나타내는 구미시의 경우는 29.3%가 제조업 연소, 18.6%가 도로이동오염원, 17.5%가 유기용제 사용에서 발생하였다.

산업이 발달한 도시(포항시, 구미시 등)의 경우, 제조업 연소와 생산공정, 유기용제 사용 배출원 등이 대기오염물질 배출량에 주로 기여하는 것으로 조사되었지만, 그 외에 산업이 발달하지 않은 시·군·구와 농업 위주의 시·군·구에서는 총 배출량의 대부분이

생물성 연소, 도로·비도로이동오염원, 비산먼지, 그리고 농업 배출원에서 주로 기여하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 상기의 포항시 및 구미시를 제외한 대부분의 시·군·구에서는 생물성 연소 배출원이 대기오염물질을 배출하는 주요 배출원으로 조사되어, 경상북도의 경우 대기오염물질 배출 저감 측면에서 생물성 연소 배출원에 대한 강력하고 다방면의 저감대책이 제시되고 이행되어야 할 것으로 판단된다. 경상북도의 대기오염물질 배출에 대한 저감 및 관리방안 마련을 위해서는 각 권역별, 시·군·구의 정확한 배출 특성 파악 및 분석이 선행되어야 하며 경상북도 23개 시·군·구의 대기오염물질 배출원에 대한 배출량 기여도 분석 수행 결과가 기초자료로서 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

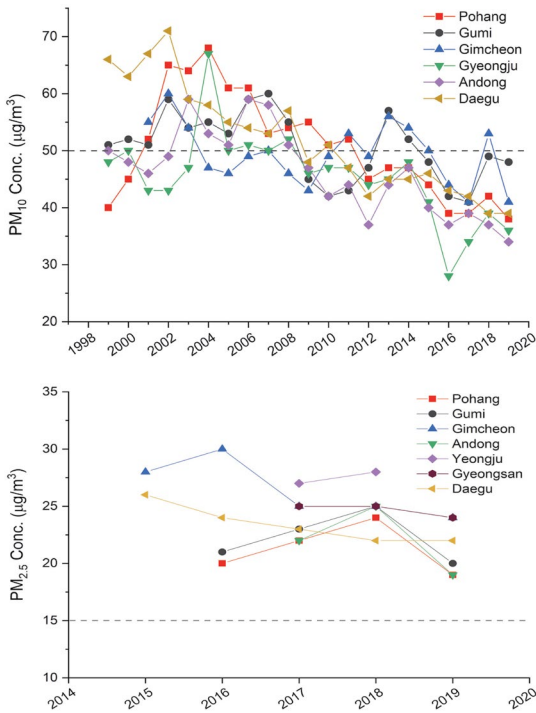


Fig. 7. Annual average concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} in major cities of Gyeongsangbuk-do.

3.2 미세먼지(PM₁₀) 및 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 경향

1999년부터 2019년까지의 경상북도 주요 도시의 대기오염측정망에서 측정한 PM₁₀ 평균농도를 비교하여 그림 7에 나타내었다. 다른 도시에 비해 포항이 비교적 PM₁₀의 농도가 높은 것으로 조사되었다. PM₁₀의 경우, 점차 평균농도가 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 경상북도의 전체 PM₁₀ 평균농도는 2015년에 45 µg/m³, 2016년에는 40 µg/m³, 2017년은 40 µg/m³, 2018년에는 44 µg/m³, 그리고 2019년에는 39 µg/m³를 나타내어 PM₁₀ 연평균 기준(50 µg/m³)을 초과하지는 않는 것으로 조사되었다. 또한 그림 7에 2015년부터 2019년까지의 경상북도 주요 도시의 대기오염측정망에서 측정한 PM_{2.5} 평균농도를 비교하여 나타내었다. PM₁₀과는 조금 다르게 PM_{2.5}의 경우는 김천이 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다

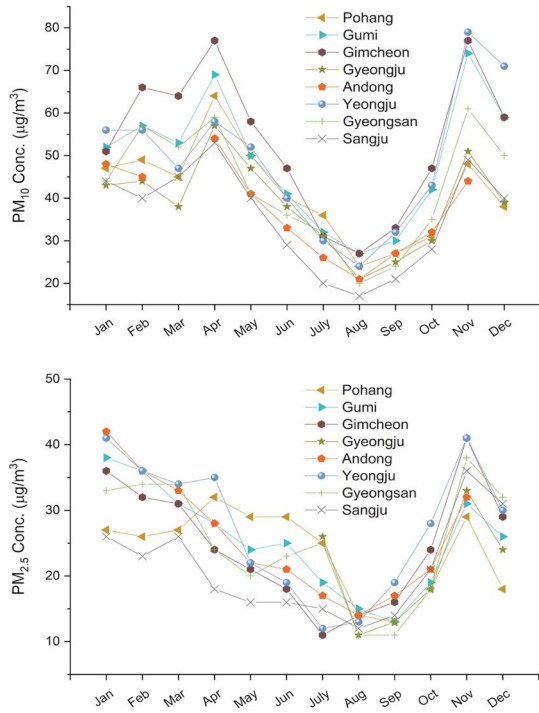


Fig. 8. Monthly average concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} in major cities of Gyeongsangbuk-do.

(Hwang and Kim, 2019). 또한 PM_{2.5}의 경우는 점차 농도가 높아지는 것으로 나타나 이에 대한 관리방안 마련이 절실하다. 그러나 경상북도의 전체 PM_{2.5} 평균농도는 2015년에 28 µg/m³, 2016년에는 23 µg/m³, 2017년은 23 µg/m³, 그리고 2018년에는 24 µg/m³, 2019년에는 20 µg/m³를 나타내어 2018년 3월에 강화된 PM_{2.5} 연평균 기준(25 µg/m³에서 15 µg/m³으로 강화됨)을 모두 초과하는 것으로 조사되었다.

경상북도 주요 도시의 2018년 월별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 평균 농도를 그림 8에, 그리고 계절별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 평균농도를 표 2에 나타내었다. PM₁₀의 경우, 8개 주요 도시 모두 아주 유사한 경향을 나타내었는데 봄, 겨울철에 주로 고농도를 나타내는 것으로 조사되었고(특히 4월에는 60.7 µg/m³, 11월에는 59.2 µg/m³로 가장 높은 농도를 나타냄), 여름철(8월에 22.2 µg/m³로 가장 낮은 농도)에는 많은 강우량과 강우빈도의

Table 2. Seasonal average concentration (μm^3) of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in major cities of Kyeongsangbuk-do in 2018.

	Pohang		Gumi		Gimcheon		Gyeongju		Andong		Yeongju		Gyeongsan		Sangju	
	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$
Spring	53	29	57	28	66	25	47	–	47	28	52	30	51	26	46	20
Summer	33	23	33	20	35	14	30	19	27	17	31	15	29	20	22	14
Fall	35	20	49	21	52	27	35	21	34	23	51	29	40	22	33	24
Winter	45	24	56	33	59	32	42	24	31	26	61	36	50	33	41	27

Table 3. The number of days exceeding air quality standard of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} during 2017~2019.

		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Sum
$\text{PM}_{2.5}$	2017	7	5	12	1	1	1	1	0	3	0	9	8	48
	2018	12	10	10	7	4	5	3	0	0	4	17	5	77
	2019	9	9	7	0	0	0	0	0	0	1	0	6	32
	SUM	28	24	29	8	5	6	4	0	3	5	26	19	157
	%	17.8	15.3	18.5	5.1	3.2	3.8	2.5	0.0	1.9	3.2	16.6	12.1	
PM_{10}	2017	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	4
	2018	2	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	6
	2019	2	1	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8
	SUM	5	1	4	1	2	0	0	0	0	3	1	1	18
	%	27.8	5.6	22.2	5.6	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	5.6	5.6	

집중에 따른 영향으로 가장 낮은 농도를 보이는 전형적인 경향을 나타내었다. 봄철과 가을철에는 황사의 영향으로 고농도 PM_{10} 이 나타난 것으로 판단되며, 겨울철의 경우 난방연료 사용의 증가로 PM_{10} 의 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 또한, 경상북도 주요 도시의 2018년 월별 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 PM_{10} 의 경우와 조금 다른 경향을 나타내었다. 1월에 $33.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도값을 보이다가 8월(최저농도 $12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)까지 계속 농도값이 낮아지는 경향을, 그리고 가을과 겨울철에는 점차 농도가 높아져 11월에는 최고농도($34.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타내었다.

PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 고농도 사례는 경상북도의 대기 오염 측정망에서 측정된 $PM_{2.5}$ 의 일평균 농도가 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 날, PM_{10} 의 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 날을 기준으로 선정하였다. 일평균 농도는 경상북도에 위치한 모든 측정망의 자료를 모두 평균한 자료이다. $PM_{2.5}$ 고농도 사례의 경우, 2017년에는 48일, 2018년은 77일, 그리고 2019년에는 총 32일 발생한 것으로 조사되었다. 3년 동안의 월별 평균 고농도 사례의 경우, 3월이 18.5%로 가장 높은 고농도 사례를 나타내었으며, 1월 17.8%, 11월 16.6%, 2월 15.3%, 12월 12.1% 순으로 조사되어 일반적인 계절별, 월별 고농도 경향을 잘 나타내고 있다(표 3). 또한 경상북도의 PM_{10} 고농도 사례의 경우는 2017년에는 4일, 2018년은 6일, 그리고 2019년에는 총 8일 발생한 것으로 조사되었으며 월별 평균 고농도 사례는 1월이 27.8%, 3월에 22.2%로 가장 높은 고농도 사례 일을 나타내었다. 반면에 6~9월의 경우는 PM_{10} 고농도 사례가 없는 것으로 조사되었다.

3.3 대기오염측정망 자료의 군집분석

자료집단 내에서 유사한 성질을 갖는 특정 그룹을 유도, 분류하는데 이용되는 통계방법인 군집분석을 이용하여(Nam et al., 2002) 경상북도 23개 시·군·구에 위치한 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 대기오염측정망 자료의 유사성을 분석하였다(그림 9). 먼저 PM_{10} 의 경우, 총 5개의 군집으로 분류하였다. 군집 1은 상주, 대평, 형곡, 원평, 칠곡, 공단, 4공단, 문당 측정소로 조사되었

다. 군집 1의 평균 농도값은 $44.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 5개 군집 중 가장 높은 농도를 나타내었으며 경상북도의 서쪽 지역에 위치한 측정소들이 포함되었다. 군집 2는 영천, 중방, 명륜, 대가야 측정소 등이 포함되었으며, 평균 농도값은 $37.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다. 군집 2의 측정소들은 주로 경상북도의 중앙에 위치하는 특징을 나타내었다. 군집 3은 대도, 장량, 송도, 성건, 3공단, 대송 측정소로 조사되었다. 군집 3의 평균 농도값은 $37.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 포항지역의 남쪽과 경주에 위치한 측정소들이 포함되었다. 군집 4는 경상북도의 북쪽 끝에 위치한 석포와 울진 측정소가 포함되었으며, 평균 농도값은 $24.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 5개 군집 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 군집 5는 포항의 청림, 오천, 장흥 측정소가 포함되었으며, 평균 농도값은 $41.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도를 나타내었다.

$PM_{2.5}$ 에 대한 군집은 총 5개의 군집으로 분류하였다. 군집 1은 포항의 오천, 송도, 청림 측정망이 포함되었으며 평균 농도값은 $20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 군집 2는 PM_{10} 과 동일하게 경상북도의 북쪽 끝에 위치한 석포와 울진 측정소가 포함되었으며, 평균 농도값은 $13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 5개 군집 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 군집 3은 3공단, 장흥, 대송, 대도, 장량, 성건 측정소가 포함되었으며 평균농도는 $20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 군집 4는 경상북도의 서쪽 중앙에 위치한 문당, 원평, 상주 측정소 등이 포함되었으며, 평균 농도값은 $21.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 5개 군집 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 마지막으로 군집 5는 영천, 명륜, 칠곡, 4공단, 중방, 형곡, 대가야 측정망이 포함되었으며 경상북도의 중앙 및 남쪽에 위치하는 특징을 나타내었다. 평균 농도값은 $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비교적 높은 농도값을 나타내었다. 이러한 결과들은 추후 경상북도의 미세먼지 저감 대책 등을 수립할 때 권역별 특성들을 고려한 대책마련을 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 먼지 배출량 및 미세먼지 농도 공간분포 분석

2015년과 2016년 CAPSS 자료를 바탕으로 경상북

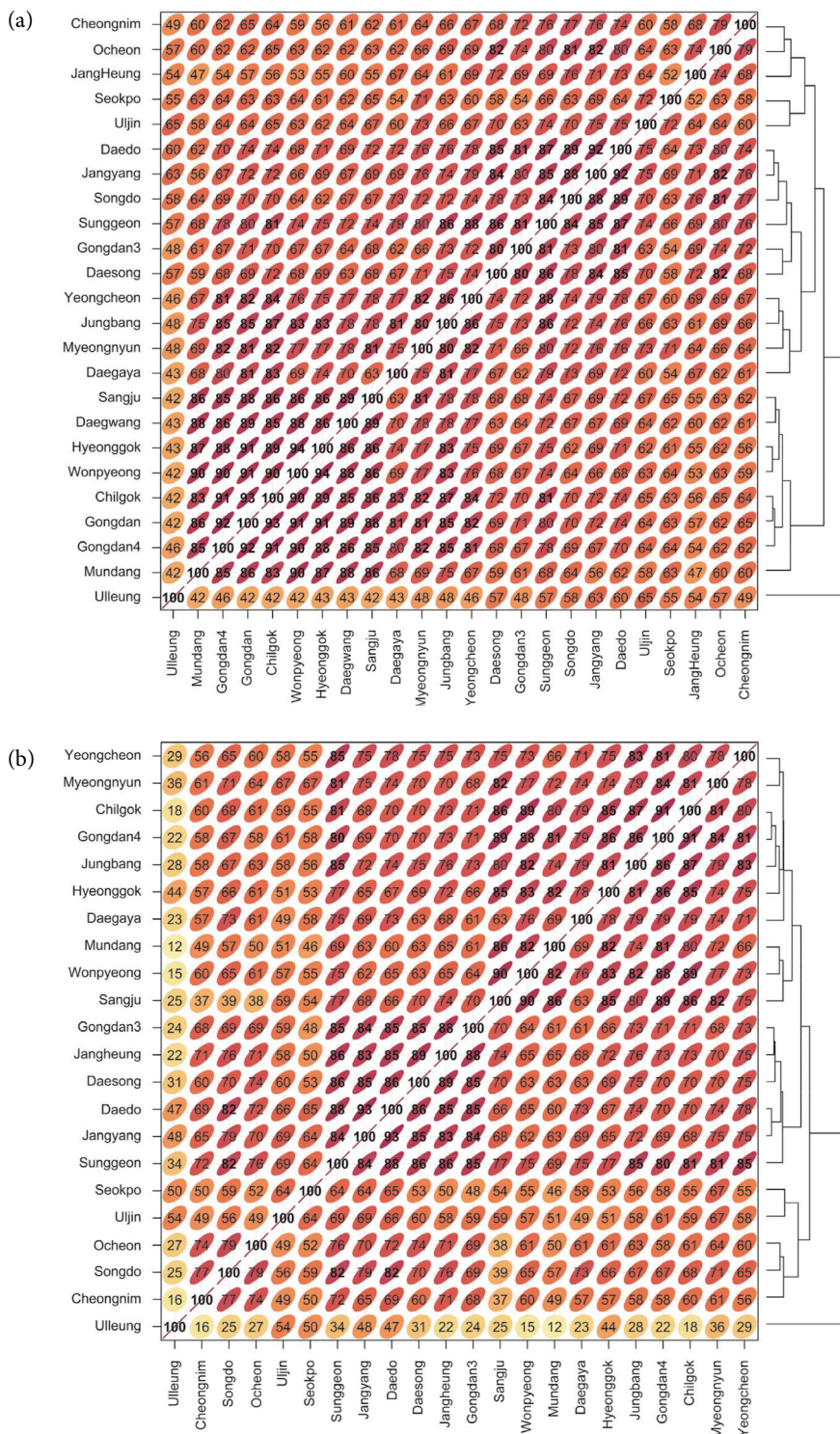


Fig. 9. Results of cluster analysis using PM₁₀ (a) and PM_{2.5} (b) air pollution monitoring network data in Gyeongsangbuk-do.

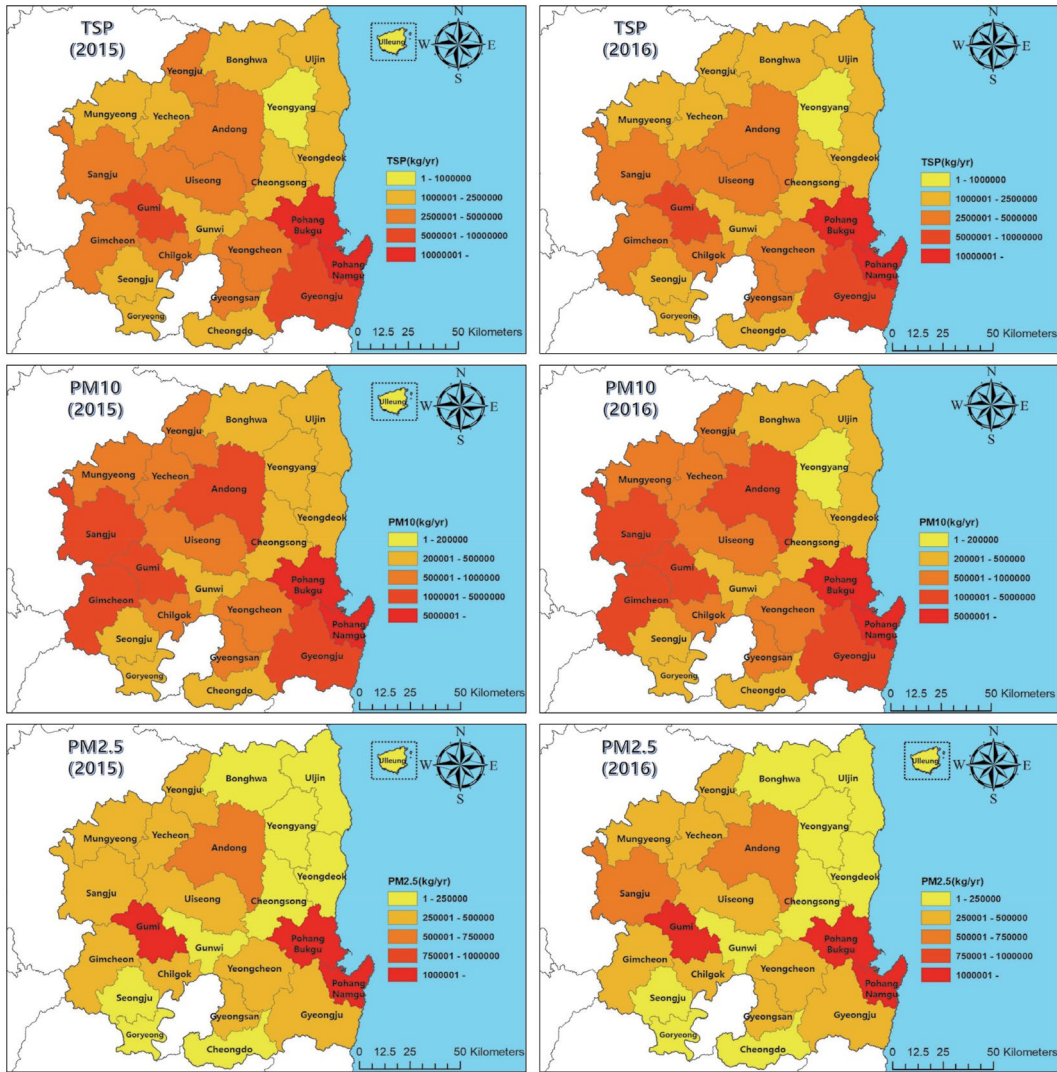


Fig. 10. Spatial distributions of TSP, PM_{10} , and $PM_{2.5}$ emission (kg/yr) in Gyeongsanbuk-do in 2015~2016.

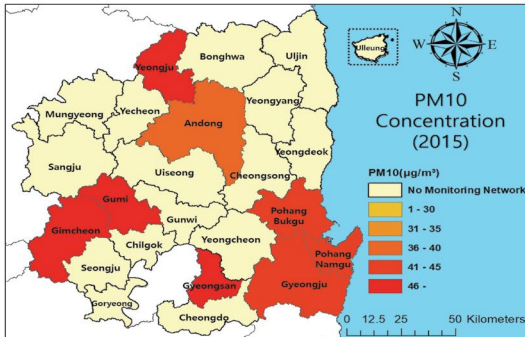
도의 시·군·구별 먼지(TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$) 배출량을 공간분석을 이용하여 그림 10에 나타내었다. 경상북도의 시·군·구 중에서 포항시의 경우 TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$ 모두 가장 많은 배출량을 나타냈으며, 구미시가 그 다음으로 많은 먼지 배출량을 나타내었다.

2015년과 2016년을 비교하였을 때 큰 변화는 없었지만 영주시는 TSP가, 영양군은 PM_{10} 의 배출량이 2016년에 감소한 것으로 조사되었으며, 상주시는 $PM_{2.5}$ 가 2016년에 증가한 것으로 나타났다. 영양군,

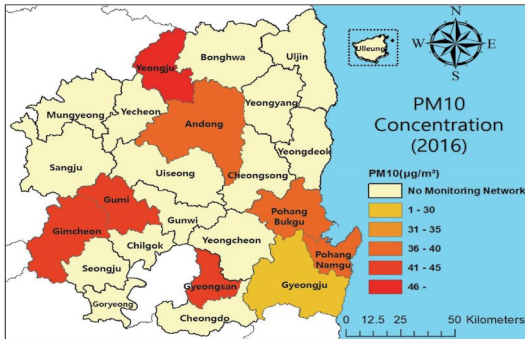
봉화군, 울진군, 영덕군, 청송군, 군위군, 청도군, 성주군, 고령군 등은 다른 지역에 비해 TSP, PM_{10} , 그리고 $PM_{2.5}$ 모두 낮은 배출량을 보였으며 포항시, 구미시, 경주시, 김천시, 상주시, 안동시 등은 다른 지역에 비해 많은 배출량을 나타냈다.

또한, 2015년부터 2017년까지의 경상북도 시·군·구별 PM_{10} 농도에 대한 공간분포 분석 결과를 그림 11에 나타내었다. PM_{10} 농도는 2015년부터 2017년에 대기오염측정망이 설치된 시·군·구로 한정하여 공

(a) 2015



(b) 2016



(c) 2017

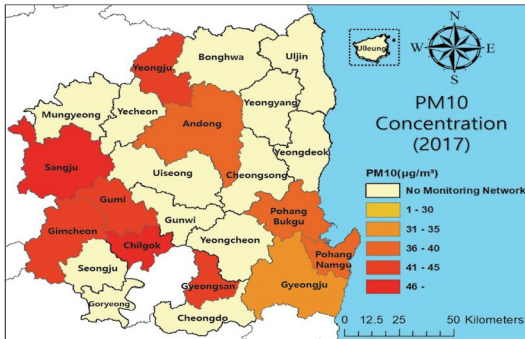


Fig. 11. Spatial distributions of PM₁₀ concentration (μg/m³) in Gyeongsangbuk-do in 2015~2017.

간분포 분석을 진행하였다. 안동시의 경우는 PM₁₀ 농도의 변화가 거의 없는 것으로, 안동보다는 높은 농도를 나타낸 영주시, 구미시, 김천시, 경산시 등도 PM₁₀ 농도의 변화는 거의 없는 것으로 조사되었다. 포항시의 경우는 2015년에는 높은 농도를 나타내었지만 2016년과 2017년에는 농도가 감소하는 경향을

나타내었다. 또한 경주시의 경우는 2016년에 미세먼지 농도가 감소하였으나 2017년에는 다시 증가하는 경향을 나타내어 그 원인 파악이 필요한 것으로 사료된다. 상주시와 칠곡군은 2016년까지는 PM₁₀ 농도가 측정되지 않았지만 2017년부터 고농도의 미세먼지가 관측되었다.

경상북도의 시·군·구별 먼지 배출량 및 PM₁₀ 농도 공간분포(농도 공간분포 분석은 PM₁₀만 수행되었으므로 배출량 공간분포 역시 PM₁₀만을 대상으로 함)는 거의 유사한 것으로 조사되었다. 즉 배출량이 높은 포항, 구미, 김천, 영주, 안동, 경산, 경주시 등은 PM₁₀의 농도 역시 높은 것으로 조사되었다. 반면에 배출된 먼지가 다른 지역으로 확산되거나 다른 지역에서 배출된 먼지가 유입됨에 따른 먼지의 농도변화에 대해서는 추후 정확한 분석이 이루어져야 확인이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경상북도의 PM₁₀과 PM_{2.5}를 배출하는 각 배출원의 배출량에 대한 고찰 및 대기오염측정망 자료를 이용한 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 경향을 분석하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

경상북도의 연도별 대기오염물질의 배출량 변화에서 2015년부터 기존의 11개 대분류에 비산먼지, 생물성 연소를 공식 배출원으로 추가하여 VOC, TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 배출량에 큰 변화가 있었다. 또한, 2016년 기준 경상북도의 배출원별 대기오염물질 배출 현황에서 TSP는 제조업 연소 및 비산먼지 배출원에서 각각 46%와 44%가 배출되었다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 주요 배출원은 각각 제조업연소(62%, 65%) 배출원으로 조사되었다. 경상북도 동부권역에는 포스코 및 제철 산업과 관련된 면 오염원 및 점 오염원(산업단지와 대형 공장 등)들이 다수 위치해 있어, 대부분의 대기오염물질 배출량이 다른 권역에 비해 높은 배출량을 나타내었다. 반면에 서부권역은 생물성 연소, 기타 면 오염원, 비산먼지 등에 의한 배출 영향을 많이 받는

것으로 확인되었다. 특히, 경상북도의 경우 대기오염 물질 배출 저감을 위해서 생물성 연소 배출원에 대한 강력하고 다방면의 저감대책이 제시되고 이행되어야 한다.

경상북도 주요 도시의 대기오염측정망에서 측정된 PM_{10} 평균농도 비교에서 다른 도시에 비해 포항이 비교적 PM_{10} 의 농도가 높은 것으로 조사되었으며, PM_{10} 의 평균농도는 점차 낮아지는 경향을 나타내었다. 경상북도 주요 도시의 대기오염측정망에서 측정된 $PM_{2.5}$ 평균농도의 경우는 김천이 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었으며, 2015~2019년 평균농도 모두 연평균 기준을 초과하는 것으로 조사되어 이에 대한 관리방안 마련이 절실하다. 경상북도 주요 도시의 월별, 계절별 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 평균 농도에서 PM_{10} 의 경우 주요 도시 모두 아주 유사한 경향을 나타내었는데 봄, 겨울철에 주로 고농도를 나타내며 여름철에는 가장 낮은 농도를 보이는 전형적인 경향을 나타내었다. 또한, $PM_{2.5}$ 의 경우는 PM_{10} 의 경우와 조금 다른 경향을 나타내는 것으로 조사되었는데 1월에 높은 농도값을 보이다가 8월까지 계속 농도값이 낮아지는 경향을, 그리고 가을과 겨울철에는 점차 농도가 높아져 11월에는 최고 농도를 나타내었다.

대기오염물질 배출 오염원의 효율적인 제어와 관리를 위해서, 또한 합리적인 환경정책을 수립하기 위해서 경상북도를 비롯하여 각 지자체들은 각각의 상황과 실정에 부합하는 미세먼지 관리방안 및 대책 등을 제시하고 실행해야 한다. 본 연구에서 수행된 경상북도 23개 시·군·구의 대기오염물질 배출원에 대한 배출량 기여도 분석 수행 결과 및 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 에 대한 농도 경향 분석 등은 경상북도의 대기오염물질 배출에 대한 저감 및 관리방안 마련을 위한 중요한 기초자료로 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Baek, K.M., Seo, Y.K., Chung, D.H., Baek, S.O. (2019) Atmospheric Occurrence and Concentrations of PAHs and Heavy Metals in Pohang, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(5), 533-554, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.533>
- Baek, S.O., Heo, Y.K., Park, Y.H. (2008) Characterization of Concentrations of Fine Particulate Matter in the Atmosphere of Pohang Area, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 30(3), 302-313, (in Korean with English abstract).
- Chen, Y.C., Chiang, H.C., Hsu, C.Y., Yang, T.T., Lin, T.Y., Chen, M.J., Chen, N.T., Wu, Y.S. (2016) Ambient $PM_{2.5}$ -bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Changhua County, central Taiwan: Seasonal variation, source apportionment and cancer risk assessment, Environmental Pollution, 218, 372-382. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.016>
- Choi, M.S., Baek, S.O. (2016) Statistical Analysis of PM_{10} and Meteorological Data in Pohang, a Steel-Industrial City, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(3), 329-341, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.3.329>
- Gyeonsangbuk-do (2019) Provincial government white book.
- Han, S.H., Kim, Y.P. (2015) Long-term trends of the concentrations of mass and chemical composition in $PM_{2.5}$ over Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(2), 143-156, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.143>
- Hwang, I.J., Kim, T.O. (2019) Chemical characteristics of ambient $PM_{2.5}$ at industrial complex in Gyeongbuk area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(3), 336-345, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.336>
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2013) IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths, Press release (NO. 221), France.
- Jeong, Y.J., Hwang, I.J. (2015) Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Gyeongsan Using the PMF Model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(6), 508-519, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.6.508>
- Ju, J.H., Hwang, I.J. (2011) A Study for Spatial Distribution of Principal Pollutants in Daegu Area Using Air Pollution Monitoring Network Data, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(5), 545-557, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.5.545>

- org/10.5572/KOSAE.2011.27.5.545
- Kim, D.S., Hwang, I.J. (2002) The origination mechanism of PM₁₀ and methodology of identification for PM₁₀ sources, *Air Cleaning Technology*, 15(1), 38-53.
- Li, K.C., Hwang, I.J. (2015) Characteristics of PM_{2.5} in Gyeongsan Using Statistical Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(6), 520-529, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.6.520>
- Ministry of Environment (MOE) (2013) Press release: Introduction of fine particle forecasting system, problems and measures.
- Ministry of Environment (MOE) (2020) Southeastern air quality management basic plan.
- Nam, B.H., Hwang, I.J., Kim, D.S. (2002) Pattern classification of PM₁₀ in the indoor environment using disjoint principal component analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(1), 25-37, (in Korean with English abstract).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) National air pollutants emission, NIER-GP2018-131.
- Pope III, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Rebert, L., Derek, T. (1992) *Fundamentals of Spatial Information Systems*, Academic Press.
- Russell, A.G., Brunekreef, B. (2009) A focus on particulate matter and health, *Environmental Science and Technology*, 43, 4620-4625. <https://doi.org/10.1021/es9005459>
- Song, H., Zhang, Y., Luo, M., Gu, J., Wu, M., Xu, D., Xu, G., Ma, L. (2019) Seasonal variation, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in different particle fractions of PM_{2.5} in Beijing, China, *Atmospheric Pollution Research*, 10(1), 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.06.012>
- Stafoggia, M., Samoli, E., Alessandrini, E., Cadum, E., Ostro, B., Berti, G., Faustini, A., Jacquemin, B., Linares, C., Pascual, M., Randi, G., Ranzi, A., Stivanello, E., Forastiere, F. (2013) Short-term associations between fine and coarse particulate matter and hospitalizations in southern europe: result from the MED-PARTICLES project, *Environmental Health Perspectives*, 121(9), 1026-1033. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206151>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1999) Air quality criteria for particulate matter, Volume I, EPA/600/P-99/002a.
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Trends of the PM₁₀ concentrations and high PM₁₀ concentration cases in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249>

Authors Information

황인조 (대구대학교 환경공학과 교수)

이태정 (경희대학교 환경학 및 환경공학과 학술연구 교수)

김태오 (금오공과대학교 환경공학과 교수)

배귀남 (한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단 단장)