

논문

군산시 도시대기 측정망자료(2017~2019년) 분석에 따른 지역 대기오염물질 특성 연구

A Study on the Characteristics of Local Air Pollutants According to the Analysis of Gunsan Air Pollutants Network Data (2017-2019)

박상훈, 김성천, 김득수*

국립군산대학교 환경공학과

Sang-Hun Park, Seong-Cheon Kim, Deug-Soo Kim*

Department of Environmental Engineering, Gunsan National University, Gunsan, Republic of Korea

접수일 2022년 4월 26일
수정일 2022년 5월 18일
채택일 2022년 6월 2일

Received 26 April 2022

Revised 18 May 2022

Accepted 2 June 2022

*Corresponding author

Tel: +82-(0)63-469-4764

E-mail: dskim@gunsan.ac.kr

Abstract The regional concentration characteristics of major air pollutants in Gunsan City were compared with those in Iksan City and the relationship between airflow patterns and pollution sources in Gunsan City and Iksan City were studied using the HYSPLIT-4. In Gunsan City from 2017 to 2019, the concentration of air pollutants NO₂ (14.6 to 11.7 ppb), and SO₂ (4.5 to 4.4 ppb) and PM₁₀ (45.3 to 44.6 μg/m³) decreased, while other pollutant concentrations tended to increase to CO (470.9 to 477.8 ppb), O₃ (32.8 to 33.1 ppb), PM_{2.5} (25.7 to 26.0 μg/m³). The monthly changes in air pollutant concentrations from 2017 to 2019 are shown below: 1) from January to February, the concentrations of SO₂ (5.1 to 5.7 ppb) increased but those of CO (602.8 to 593.9 ppb), NO₂ (16.0 to 14.1 ppb) decreased, respectively; 2) from May to June, the concentration of O₃ decreased from 39.9 to 38.8 ppb; from March to May, the concentration of PM₁₀ decreased from 53.4 to 49.7 μg/m³; but from January to March, PM_{2.5} increased from 29.9 to 36.9 μg/m³; PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were highest from March to May due to the yellow sand. The average values of all air pollutants from July to August were lower than in different months because of wash out and rain out. Analysis of seasonal changes in air pollutant concentrations showed that SO₂ and NO₂ were fall > winter > spring > summer, CO was winter > fall > spring > summer, O₃ was spring > summer > winter > fall, and PM₁₀ and PM_{2.5} were spring > winter > fall > summer. Concentrations of SO₂ (5.5 ppb) and PM₁₀ (46.7 μg/m³) were in the industrial area of Gunsan city and in the commercial area of Iksan SO₂ (4.4 ppb), PM₁₀ (52.0 μg/m³) were high. In the residential area of Gunsan city, CO (461.7 ppb) and PM_{2.5} (43.9 μg/m³) concentrations were high, and in the industrial of Iksan city, CO (544.3 ppb) and in the commercial area of Iksan city, PM_{2.5} (34.0 μg/m³) concentrations were high respectively. The concentration of O₃ was high in industrial areas (Gunsan 34.5, Iksan 31.3 ppb) and the concentration of NO₂ was high in commercial areas (Gunsan 14.0, Iksan 17.1 ppb). Cluster analysis using the HYSPLIT-4 classified Gunsan City into 4 clusters in 2017, 6 clusters in 2018, and 5 clusters in 2019, and Iksan City into 5 clusters in 2017, 6 clusters in 2018, and 4 clusters in 2019. Gunsan City and Iksan City seemed to be most influenced by southern Russia, Chinese Manchuria, eastern China, and the Mongolian region, with no clear differences between the regions.

Key words: Gunsan, Air pollutants, Regional characteristics, HYSPLIT-4

1. 서론

대기오염은 인간 삶의 개선을 위한 산업 활동과 매우 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 대기오염은 산업

특성에 따른 에너지 형태와 사용과정, 연료성분 등 물리화학적 특성에 따라 다양한 물리적 형태(기체상, 액체상, 고체상)와 화학성분들을 대기 중으로 발생시키며, 인간을 포함한 다른 생명체와 자연환경에 위해를

가하는 오염물질들을 배출한다.

배출되는 오염물질들은 생성과정에 따라서 연료 연소과정 등 배출원으로부터 직접 대기로 배출되는 1차 오염물질(SO_x , NO_x , 먼지, 매연 등 기체와 고형물질)과 1차 배출된 오염물질들이 대기 중에서 다시 다른 형태의 물리화학(예를 들면 태양광에 의한 광화학 반응 또는 입자와 기체와의 반응 등) 변환반응 등을 거쳐 생성되는 2차 오염물질(oxidants, PAN, aldehyde, PBN 등)로 구분할 수 있다. 대기 중으로 배출되는 오염물질들의 일반적인 대기오염물질의 농도는 배출원의 배출강도, 오염물질의 물리화학적 특성, 지형적 특성과 기상조건 등에 따라 크게 영향을 받을 수 있다(Seo *et al.*, 2012).

주요 대기오염물질을 살펴보면 기체상 오염물질로 SO_2 는 무색의 자극성이 있는 불연성 가스로서, 주요 배출원은 난방시설, 발전 및 산업용 연소시설에서 석탄 및 석유의 화석연료, 금속, 제련공정, 산업공정에서 발생하고(Kim and Son, 2020), 시정장애를 일으키는 PM_{10} 의 주요 원인물질이다. 또한 아황산가스(SO_2)는 질소산화물($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)과 함께 산성비의 주요 원인물질로 토양, 호수, 하천의 산성화에 영향을 주며, 빌딩이나 기념물 등 각종 구조물의 부식화를 촉진시킨다. 일산화탄소(CO)는 탄소성분이 불완전 연소될 때 발생한다. CO의 주요 배출원은 도로수송부문이 차지하며, 비도로이동부분의 경우, 연료연소가 있으며 담배연기, 지역난방 발생원 등이 있다. 또한 CO는 혈액 순환과정 중에 산소 운반 역할을 하는 헤모글로빈을 카르복시헤모글로빈(CO₂Hb)으로 전환시켜, 그로 인해 산소 운반기능을 낮추게 하여 사람을 사망으로 이르게 한다(NIER, 2018).

도심 차량 배기와 산업공정 등 연료연소에 따른 NO_2 는 대기 중에서 낮에 주로 태양광(파장 $\lambda \leq 430$ nm, 자외선)으로 인해 광분해(photolysis)된다. 대기로 배출된 질소산화물(NO_y)은 대기 중 광화학(광분해) 과정을 거쳐 대기 중에 오존을 생성하는 전구체(precursor)의 역할을 한다. 이때 질소산화물의 주요 배출원은 도심에서는 주로 이동오염원인 자동차와 함

께 인근 공단지역이며, 발전소 등 열에너지를 생산하는 연소공정이 주요 역할을 한다.

오존(O_3)은 NO_x ($=\text{NO} + \text{NO}_2$)와 VOC (volatile organic compound) 등이 자외선에 의한 일련의 화학반응과정을 거쳐 생성되며, peroxyacetyl nitrate (PAN: $\text{CH}_3\text{CO}-\text{OO}-\text{NO}_2$), aldehyde 등의 광화학 산화물(Photochemical Oxidant)의 일종이다. 일정 수준의 농도에서 O_3 에 장기간 노출이 되면 염증, 만성 폐 질환 발병의 원인이 될 수 있고 호흡기 질환자, 어린이 등에 치명적이다(Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2008). 대기 중 미세먼지는 입자의 크기에 따라 PM_{10} ($10 \mu\text{m}$ 이하)과 $\text{PM}_{2.5}$ ($2.5 \mu\text{m}$ 이하)로 구분이 되며, $\text{PM}_{2.5}$ 는 초미세입자로 폐 기능의 저하를 초래하며, 혈관 기능 장애와 함께 혈전증 등 심혈관계 증상 원인물질로 알려져 있다(Deng *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2000).

군산시는 지리적 특성상 한반도 서해안 새만금지역에 접해 있으며, 전주시까지 약 ~48 km, 중국의 칭타오는 약 ~574 km 떨어져 있다. 따라서 지정학적 위치를 고려하면 편서풍의 영향으로 중국으로부터의 서풍 계열의 바람을 타고 서해안 지역으로 유입되는 오염원과 함께 새만금 항만 인근 지역을 통과하는 선박 배출로 인한 이동오염원과 함께 새만금 산업단지에서 배출되는 고정오염원, 도로이동오염원 등의 영향이 가중되어 지역오염 악화가 우려될 수 있다. 한편 군산시의 경우 지속적인 대기질 관리계획에도 불구하고 주요 대기오염물질인 O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도가 국가에서 제시하는 대기환경기준을 꾸준히 초과하고 있음을 보인다. 2017년 군산시 대기환경기준 초과횟수는 오존 1시간 11회, 8시간 199회, PM_{10} 24시간 15회, $\text{PM}_{2.5}$ 24시간 70회로 나타났다(NIER, 2017).

군산시는 전라북도 내에서는 대기오염물질의 배출량이 가장 큰 비중을 차지하는 지역과 더불어 환경부가 지정·관리하는 대기관리권역에 포함하는 지역이지만, 대기오염물질 분석에 따른 지역 대기오염특성의 주요 원인과 오염원을 규명하는 연구는 부족한 실정이다.

이번 연구에서는 군산시를 중심으로 주요 대기오염

물질의 농도와 특성을 고려하고, 주요 오염원에 따른 상업, 주거, 공단지역(대기오염 특성)을 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 도시대기 지역별 측정망 자료와 기상자료를 이용하였다. 또한 한반도 인근의 지정학적 영향에 따른 주변 지역(주로 중국으로부터의 오염물질 이동영향)의 오염물질의 이동과 확산에 영향을 줄 수 있는 서해안 지역 주요 기단의 발원지와 오염물질 농도와의 연관성, 그리고 지역에 미치는 외부 인자들의 영향 등을 분석하기 위해 역궤적 모델(HYSPLIT-4)을 이용하여 역궤적(Back trajectory) 분석을 수행하고 그에 따른 군집 특성을 분석하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 자료수집 및 분석

본 연구에서는 군산시 주요대기오염물질 농도와 지역대기질 특성을 분석하기 위해 대기오염물질 자료를 제공하는 ‘에어코리아’ (<https://www.airkorea.or.kr>)를 통해 군산시 도시대기 지역별 측정망 3곳(신평동, 소룡동, 개정동)의 2017년에서 2019년까지 측정된 자료를 이용하여 대기오염물질의 연간별, 월별, 계절별 농도 경향을 파악하였다. 자료수집에 따른 제한과 군산시의 대기오염물질 배출량이 2017년부터 감소하는 경향을 보이며, 이후 2019년부터 다시 증가하여, 이에 따른 농도 특성에 변화와 원인을 분석하기 위해 3년간 자료를 이용하였다. 또한 군산시 지역 대기질 특성(상업, 주거, 공단)을 비교하기 위해 익산시 도시대기 지역별 측정망 3곳(남중동, 모현동, 팔봉동)의 자료를 이용하였다. 최근 3년간 군산시의 대기오염물질 자료 결측률은 신평동 SO₂ (2%), CO (2%), O₃ (1%), NO₂ (4%), PM₁₀ (6%), PM_{2.5} (6%), 개정동 SO₂ (10%), CO

(12%), O₃ (3%), NO₂ (4%), PM₁₀ (6%), PM_{2.5} (7%), 소룡동 SO₂ (3%), CO (2%), O₃ (2%), NO₂ (3%), PM₁₀ (11%), PM_{2.5} (23%)로 나타났다. 해당 자료 선별기준은 도시대기 지역별 측정망에서 매시간 측정되는 자료에서 해당 장비의 점검과 통신장애 등이 발생하는 경우 표시하는(“-999” 및 “0”)값을 제외한 모든 자료를 이용하였다. 기상자료는 기상청이 ‘기상자료개방포털’ (<https://data.kma.go.kr>)을 통하여 자료를 제공하는 종관기상관측(ASOS: Automated Synoptic Observing System)에서 시간별로 측정된 기온, 습도, 강수량, 풍속을 이용하였다.

2.2 도시대기 지역별 측정망

군산시 도시대기 지역별 측정망은 3곳(상업 1곳, 주거 1곳, 공단지역 1곳)이다(그림 1과 표 1). 1989년 6월 신평동(상업지역), 1995년 12월 소룡동(공단지역), 1997년 2월 개정동(주거지역)에 설치되어 운영하고 있다. 신평동은 상업지역으로 신평동 주민센터 2층 옥상에 설치, 주변은 상가들이 밀집되어 있고 2차선 도로가 위치하여 교통량이 비교적 빈번한 지역이다. 개정동은 주거지역으로 개정동 주민센터 2층 옥상에 설치, 주변에는 아파트 단지, 공공기관 시설 등으로 교통량이 많고, 서북쪽 지역으로는 숲과 야산이 있다. 소룡동은 공단지역으로 공단 내 롯데주류BG 사무실 옥상에 설치, 주변은 화물차와 승용차 등 교통량이 많고, 주변 공장에서 배출되는 오염원들의 영향이 많은 지역이다.

2.3 역궤적 모델(Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory-4)

군산시의 공기 이류에 따른 기류패턴과 해당 측정지점에 도달한 발원지 오염원 농도의 연관성을 파악

Table 1. Location of Gunsan air pollutant network information.

Station code	Name	Installation year	Location	Around environment
735121	Sinpung-dong	1989	215 Daehak-ro, Gunsan	Commercial area
735122	Soryoung-dong	1995	176-1 Soryoung-dong, Gunsan	Industrial, Sea area
735123	Gaejeong-dong	1997	339-7 Beon yeong-ro, Gunsan	Residential area

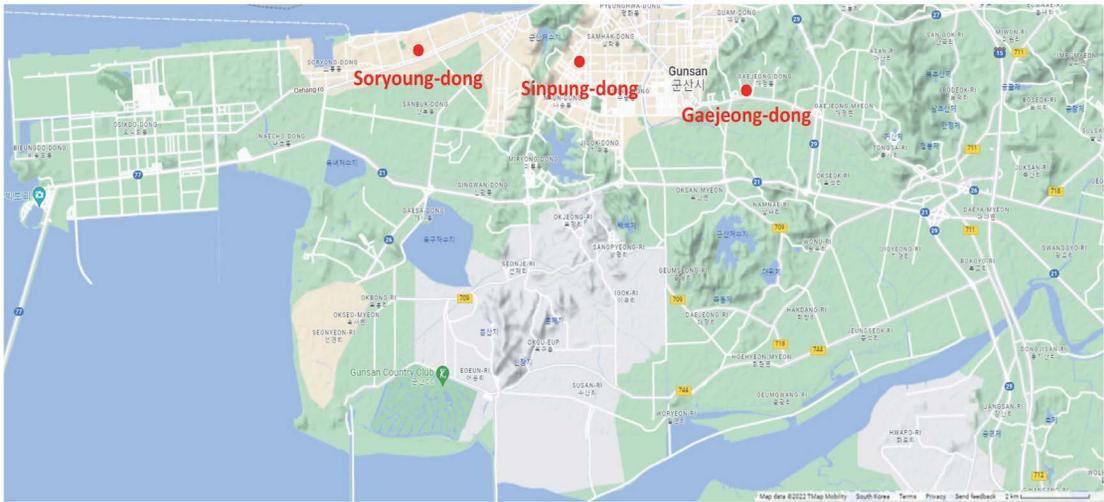


Fig. 1. Location of Gusan air pollutant network (commercial: Sinpung-dong, residential: Gaejeong-dong, industrial: Soryoung-dong).

하기 위해 미국 해양대기국(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 역궤적 모델(HYSPLIT-4)을 이용하였다. 역궤적 분석에 이용한 기상자료는 미국 NCEP 기상 예측 모델 결과의 Global Data Assimilation System(GDAS) 분석 자료를 이용하였다. 또한 이류방향으로부터의 주요오염원 영향에 따른 군집의 특성을 분석하였다. 2017년부터 2019년까지 군산시 소룡동 측정소와 익산시 팔봉동 측정소 500 m 상공에서 기준시간 6시간 간격으로 72시간 동안 역궤적 분석을 수행하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 대기오염물질 연간 변화

군산시는 전라북도 지역에서 13번째의 면적 397.27 km²이며(MOIS, 2022), 도내 지역에 비해 작은 면적(4.9%)이지만 전라북도에서 가장 많은 대기오염물질 배출량을 배출한다. 기후 특성은 서해와 인접하여 해양성 기후를 보이며, 해무가 자주 발생한다. 2~4월은 북서풍이 비교적 강하게 불고, 봄과 가을철의 맑은 날

은 해륙풍에 의하여 내륙지역보다 기온이 낮게 형성된다(KMA, 2022). 최근 3년간(2017~2019년) 전라북도의 황사 관측일은 2017년 4월(4회), 5월(1회), 11월(2회)까지 총 7회, 2018년 4월(2회), 11월(3회)에 총 5회, 2019년 11월(2회)에는 총 2회로 관측되었다. 황사는 주로 봄철(3~5월)에 자주 관측되며, 일반적으로 황사의 주요 발원지는 고비사막 23%, 타클라마칸 사막 40%, 황토고원과 만주 30%로 알려져 있다.

2017~2019년 대기오염물질 배출량 통계(시군구별, 배출원소분류별, 연료별)에 따르면, 전라북도 배출원 총량을 규모로 살펴보면 군산시는 2017년 53,724 ton, 2018년 51,965 ton, 2019년 61,258 ton이며, 도내의 지역에 비해 매우 우세한 것으로 나타났다(NAIR, 2022). 2017년 배출량을 기준으로 시군별과 비교하면 군산시 외에 전주시 덕진구 26,689 ton, 익산시 22,738 ton, 완주군 18,034 ton, 정읍시 17,896 ton, 부안군 17,604 ton, 김제시 16,153 ton, 고창군 15,088 ton, 남원시 12,115 ton, 전주시 완산구 12,049 ton, 임실군 9,289 ton, 장수군 7,263 ton, 순창군 7,122 ton, 진안군 7,066 ton, 무주군 6,476 ton 순으로 나타났다. 전라북도의 각 시군에 비해 적게는 1.4배(전주시)에서 많게

Table 2. Annual average of Gunsan air pollutants data (2017~2019).

		2017	2018	2019	Avg
SO ₂ (ppb)	Mean ± sd	4.5 ± 1.9	4.0 ± 1.4	4.4 ± 1.1	4.3 ± 1.5
	Range	1.0~9.8	1.4~8.7	2.0~8.8	1~9.8
	N	365	365	365	1095
CO (ppb)	Mean ± sd	470.9 ± 141.0	528.2 ± 168.0	477.8 ± 156.7	492.3 ± 157.6
	Range	181.9~1035	192.4~1052	204.2~1233	181.9~1233
	N	365	365	365	1095
O ₃ (ppb)	Mean ± sd	32.8 ± 12.2	28.9 ± 10.3	33.1 ± 12.8	31.6 ± 11.9
	Range	3.8~81.7	7.3~59.2	6.8~92.2	3.8~92.2
	N	365	365	365	1095
NO ₂ (ppb)	Mean ± sd	14.6 ± 6.0	12.9 ± 6.8	11.7 ± 4.8	13.1 ± 6.0
	Range	5.1~43.0	3.1~34.0	2.6~28.5	2.6~43.0
	N	365	365	365	1095
PM ₁₀ (µg/m ³)	Mean ± sd	45.3 ± 21.6	42.8 ± 21.4	45.7 ± 26.7	44.6 ± 23.4
	Range	13.1~219.4	8.4~147.0	5.7~212.6	5.7~219.4
	N	365	365	365	1095
PM _{2.5} (µg/m ³)	Mean ± sd	25.7 ± 14.9	25.8 ± 15.1	26.5 ± 20.0	26.0 ± 16.9
	Range	2.1~91.9	3.4~110.1	1.7~147.3	1.7~147.3
	N	338	365	365	1068

Table 3. Annual average of Gunsan meteorological data (2017~2019).

		2017	2018	2019	Avg
Temperature (°C)	Mean	15.3	15.8	15.0	15.4
	Range	0.1~35.8	0.1~36.4	0.1~34.5	0.1~36.4
Humidity (%)	Mean	76.2	75.2	75.0	75.5
	Range	20~100	22~100	13~100	13~100
Precipitation (mm)	Mean	9.0	2.9	2.1	6.7
	Range	9.0	0.1~37.5	0.1~52.1	0.1~52.1
Wind speed (m/s)	Mean	2.1	2.0	1.8	2.0
	Range	0~11.5	0~11.4	0~11.6	0~11.6

는 8.3배(무주군) 수준의 배출량 차이를 보였다.

군산시 대기오염물질 연간 농도의 평균값을 나타내면 표 2와 같다. 평균값은 신평동, 개정동, 소룡동 측정소 3개의 평균값을 나타내었다. NO₂ 농도만 14.6~11.7 ppb 감소하며, SO₂ 4.5~4.4, CO 470.9~477.8, O₃ 32.8~33.1 ppb로 증가하는 경향이 보였다. 마찬가지로 PM₁₀ 45.3~44.6 µg/m³, PM_{2.5} 25.7~26.0 µg/m³로 평균값은 큰 차이가 없거나 오히려 증가하였다. 표 3

은 군산시 기상자료(기온, 습도, 강수량, 풍속)의 연간 평균값을 나타내었다. 기온 15.3~15°C, 습도 76.2~75%, 강수량 9.0~2.1 mm, 풍속 2.1~1.8 m/s로 강수량만 차이가 나타났다. 그림 2는 군산시 대기오염물질의 연간 변화를 나타내었다. 각 오염물질의 대기환경기준을 표시하였고, SO₂, CO 농도는 대기환경기준에 만족하고, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 대기환경기준을 초과하였다.

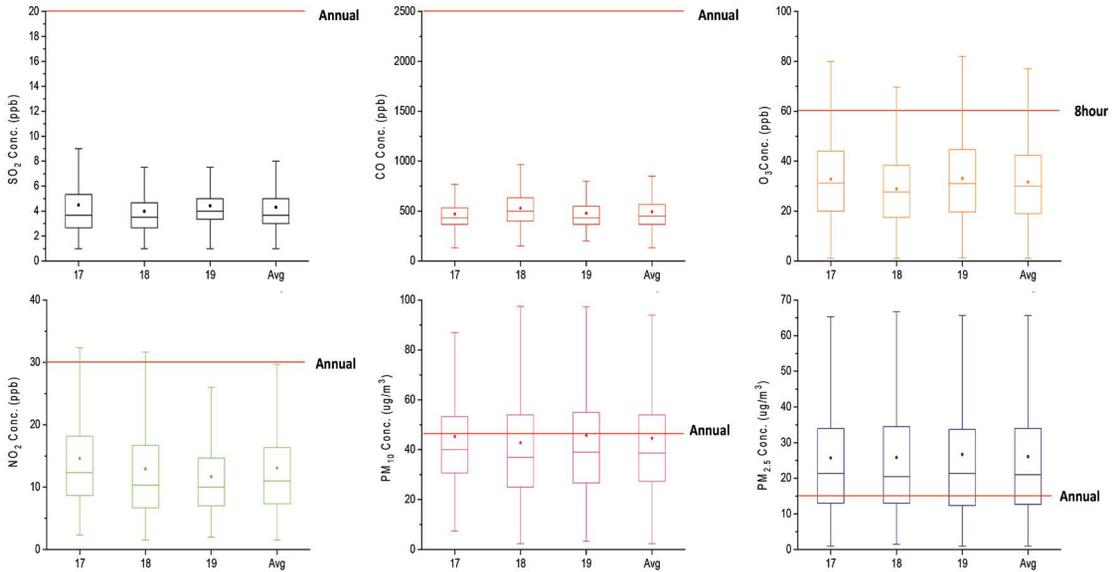


Fig. 2. Annual average concentration of air pollutants in Gunsan 2017~2019 (average concentration of three measuring stations in Sinpung-dong, Gajeong-dong, and Soryong-dong).

우리나라 대기환경기준은 O₃ 1시간 100 ppb, 8시간 60 ppb, PM₁₀ 연간 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 연간 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 군산시 PM₁₀의 24시간 대기환경기준 초과일 2017년 15회, 2018년 18회, 2019년 43회이며, PM_{2.5}의 24시간 대기환경기준 초과일 2017년 84회, 2018년 204회, 2019년 224회로 PM₁₀과 PM_{2.5}는 해마다 초과일이 증가하고 있다. 특히 2018년부터 PM_{2.5}의 초과일이 급격히 증가한 이유는 2018년 3월 27일부터 PM_{2.5}의 대기환경기준이 24시간 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 한층 강화된 영향을 받은 것으로 보인다. 봄과 가을철은 중국에서 불어오는 바람이 전북지역으로 유입되는 과정에서 중국의 동북부 공단지역에서 배출된 오염물과 더불어 국내 화석연료에서 배출되는 PM_{2.5}와 대기 정체가 갖은 영향으로 대기환경기준 초과일이 많은 것으로 판단된다. SO₂, CO, O₃의 연간 농도는 감소 및 증가하는 경향이 나타나는데, 이는 군산시에 한국서부발전(군산발전본부), OCISE, 선박과 선박 관련 업체들이 다수 위치함에 농도가 높게 나타나는 특징을 보이는 것으로 판단된다. 공단단지가 도심지역과 혼재된 경우는

공단지역에서 발생하는 오염원은 도시지역의 차량 운행에 의한 오염물질 배출로 인해 지역 대기질 악화(Oh et al., 2009; Hwang et al., 2008)가 발생하므로, 이를 방지하기 위한 노력이 필요하다.

3.2 대기오염물질 월별 변화

군산시 대기오염물질 월별 평균값 SO₂, CO, NO₂는 1~2월(5.1~5.7, 602.8~593.9, 16.0~14.1 ppb) O₃은 5~6월(39.9~38.8 ppb), PM₁₀이 3~5월(53.4~49.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), PM_{2.5}가 1~3월(29.9~36.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 높고, 7~8월은 모든 대기오염물질의 평균값이 다른 월별에 비해 낮았다. 그림 3은 2017~2019년 군산시 대기오염물질의 월별 변화를 나타내었다. 5~6월의 높은 오존 농도는 기온과 습도가 높은 7~8월보다 적당한 온도와 낮은 습도로 인한 고농도 오존이 발생하는 것으로 판단된다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 황사로 인해 3~5월에 가장 높은 농도를 보였다.

월별 대기오염물질의 변화는 7~8월에 전체적으로 모든 농도가 감소하는데, 이는 우리나라 계절 기후의 특성상 여름철에 집중되는 강우로 인한 오염물질의

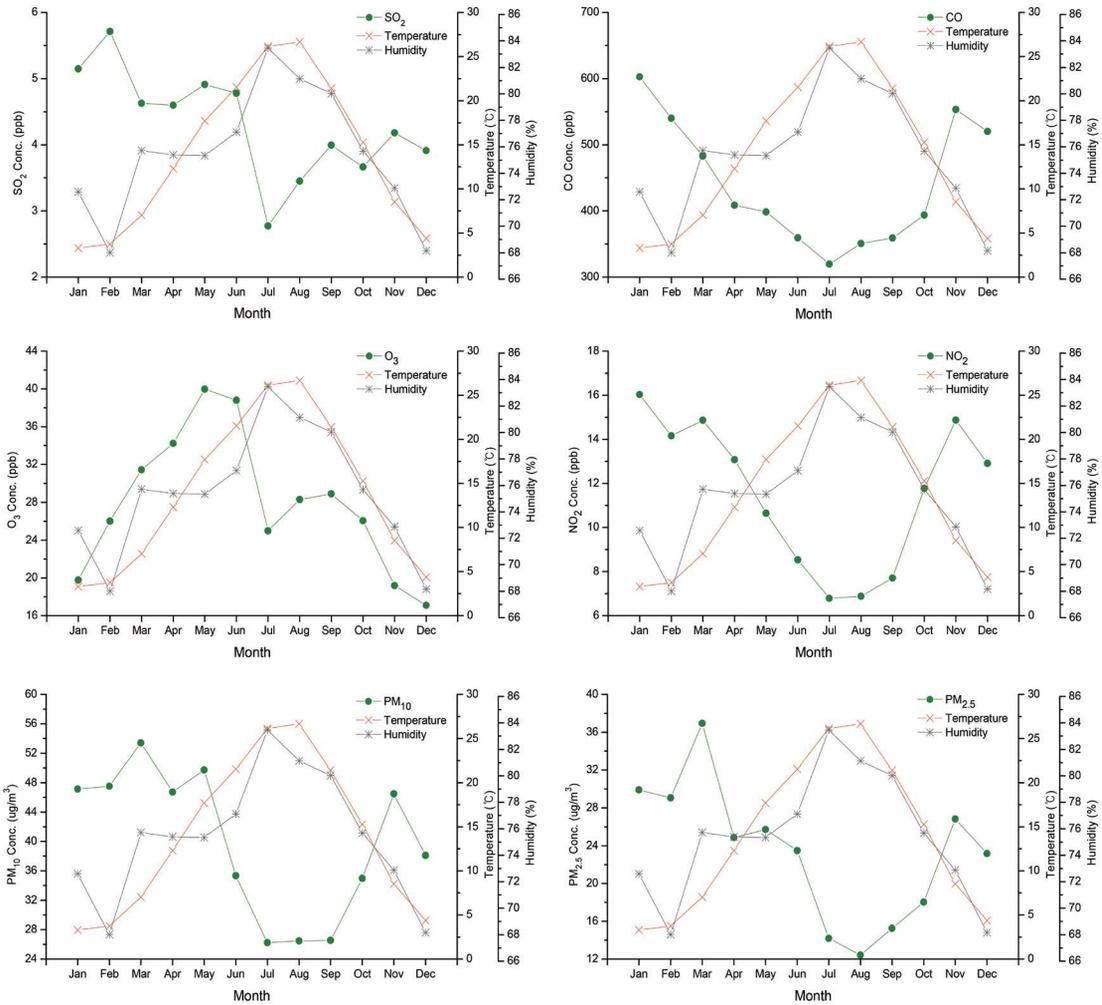


Fig. 3. Monthly variation of air pollutants in Gunsan 2017~2019.

세정효과(washout)로 인해 농도가 감소하는 것으로 판단된다. 군산 기상청 자료에서 군산시 여름철 강수량은 2017년 422.8 mm, 2018년 913.3 mm, 2019년 377.4 mm이며, 2019년은 가을철 398.3 mm로 가장 높게 나타났다. SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}는 9~11월에 농도가 증가하는데, 이는 지역난방에서 배출되는 일차 오염원의 영향과 대기의 잦은 정체로 인한 영향으로 보인다. 일반적으로 대기 중 NO₂ 농도는 차량 이동량에 따른 도로이동오염원의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Chung *et al.*, 2019). 군산시 자동차등록대수

는 2017년 130,345대에서 2019년 134,093대로 약 3,700대가 증가하였으나(KOSIS, 2022), NO₂의 농도는 감소하는 경향을 보이는데, 이는 친환경자동차 보급 확대와 경유차 배출가스 저감사업이 도입된 이후 농도가 감소한 것으로 판단된다. 군산시는 2017년부터 친환경자동차를 보급하였으며, 2018년까지 94대를 보급하였다. 군산시 대기오염물질 배출량 변화에서도 2017년 도로이동오염원 4,190 ton (7.8%)에서 2019년 3,349 ton (5.5%)으로 약 2.8% 감소하는 경향이 나타났다. 미세먼지는 이차적인 생성에 의한 영향

이 상당히 크며, 오존농도가 높은 경우에는 미세먼지 농도도 함께 증가하는 경향(Kim, 2006)을 보인다고 알려져 있다. 이번 연구 결과에서도 오존과 미세먼지의 농도가 증가하는 경향을 보였다.

미세먼지 주요 배출원은 비산먼지 비중이 가장 크게 차지하며, 비산먼지 배출사업장은 군산시가 두 번째로 많은 것으로 나타났다. 월별 대기오염물질 변화에서 3월, 5월, 11월에 PM₁₀과 PM_{2.5}의 고농도 변화는 중국으로부터 유입되는 오염물의 수송과 황사의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 배출원에서 직접 배출되는 NO₂, SO₂, CO는 일차오염원이며 이들의 농도는 지표면의 대류현상과 잦은 강수에 의한 영향을 받으며 연료 사용량이 적은 여름철에는 농도가 대체적으로 낮고, 특히 연료 사용량이 증가하는 겨울에 농도가 급격히 높게 나타나는 변화를 보였다(Kim and Ma, 2009).

3.3 대기오염물질 계절별 변화

군산시 대기오염물질 계절별 변화를 봄 3~5월, 여

름 6~8월, 가을 9~11월, 겨울 12~2월로 구분하였다. 표 4는 3년간(2017~2019) 군산시 대기오염물질의 계절별 평균값을 나타내었다. SO₂는 가을 6.0 ppb로 가장 높고 여름에 3.6 ppb로 가장 낮으며, CO는 겨울 626.7 ppb, 여름 376.2 ppb로 나타났다. O₃은 봄에 39.3 ppb로 높게 나타나며, NO₂는 가을 17.5 ppb로 높고 여름 8.5 ppb로 낮으며 SO₂ 계절변화와 유사하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 황사가 잦은 봄에 56.6 µg/m³, 32.8 µg/m³로 높고 여름 33.2 µg/m³, 18.8 µg/m³로 낮게 나타났다. 계절에 따른 기온과 습도는 여름에 24.1°C와 81.3%로 가장 높고 강수량은 가을 2.5 mm, 풍속은 봄에 2.2 m/s로 평균값을 보였다(표 5).

일반적으로 오존은 NO₂의 광분해와 광화학 반응이 활발한 여름철에 가장 높은 농도를 보인다고 알려져 있으나, 군산시의 경우는 서해안에 접해 있어 해양입자 등의 영향으로 봄에 가장 높은 오존농도 39.3 ppb로 나타났다. 대류권오존은 전구물질인 CO, NO_x와 non-methan hydrocarbon이 빛과 작용을 하여 형성되는데, 이러한 조건이 부합되는 시기는 태양 일사량이

Table 4. Seasonal variation of air pollutants in Gunsan (2017~2019).

		Spring	Summer	Fall	Winter
SO ₂ (ppb)	Mean ± sd	4.7 ± 1.5	3.6 ± 1.3	6.0 ± 1.0	4.9 ± 1.6
	Range	2.3~12.1	1.5~12.5	3.0~10.8	2.0~12.5
	N	2208	2208	2184	2160
CO (ppb)	Mean ± sd	477.2 ± 93.2	376.2 ± 51.3	568.5 ± 101.0	626.7 ± 118.0
	Range	285.7~988.8	262.5~644.4	457.1~835.6	375.0~1250
	N	2208	2208	2184	2160
O ₃ (ppb)	Mean ± sd	39.3 ± 13.2	35.1 ± 13.2	24.1 ± 3.0	22.8 ± 9.3
	Range	5.8~80.6	7.8~71.2	16.4~29.0	3.0~51.6
	N	2208	2208	2184	2160
NO ₂ (ppb)	Mean ± sd	14.4 ± 4.9	8.5 ± 2.3	17.5 ± 1.2	16.2 ± 5.8
	Range	4.8~33.8	3.0~19.0	9.2~21.5	3.8~39.2
	N	2208	2208	2184	2160
PM ₁₀ (µg/m ³)	Mean ± sd	56.5 ± 19.3	33.2 ± 9.6	45.3 ± 2.5	48.6 ± 14.6
	Range	21.7~145.2	14.2~77.0	24.9~58.0	17.8~112.3
	N	2208	2208	2184	2160
PM _{2.5} (µg/m ³)	Mean ± sd	32.8 ± 13.7	18.8 ± 7.8	28.6 ± 3.8	30.6 ± 13.0
	Range	9.7~100.1	3.5~46.5	14.0~51.5	6.3~86.8
	N	2208	2208	2184	2160

Table 5. Seasonal variation of air meteorological in Gunsan (2017~2019).

		Spring	Summer	Fall	Winter
Temperature (°C)	Mean	12.0	24.1	16.0	4.2
	Range	0.2~29.6	13.4~34.5	0.1~30.1	0.1~14.9
	N	2178	2208	2168	1442
Humidity (%)	Mean	71.9	81.6	77.0	69.3
	Range	13~100	26~99	31~99	24~100
	N	2206	2208	2179	2160
Precipitation (mm)	Mean	1.5	2.1	2.5	1.7
	Range	0.1~15.5	0.1~26.2	0.1~52.1	0.1~8.6
	N	100	172	155	43
Wind speed (m/s)	Mean	2.2	1.9	1.7	1.7
	Range	0.0~11.4	0.0~8	0.0~11.6	0.0~8.9
	N	2206	2207	1987	2150

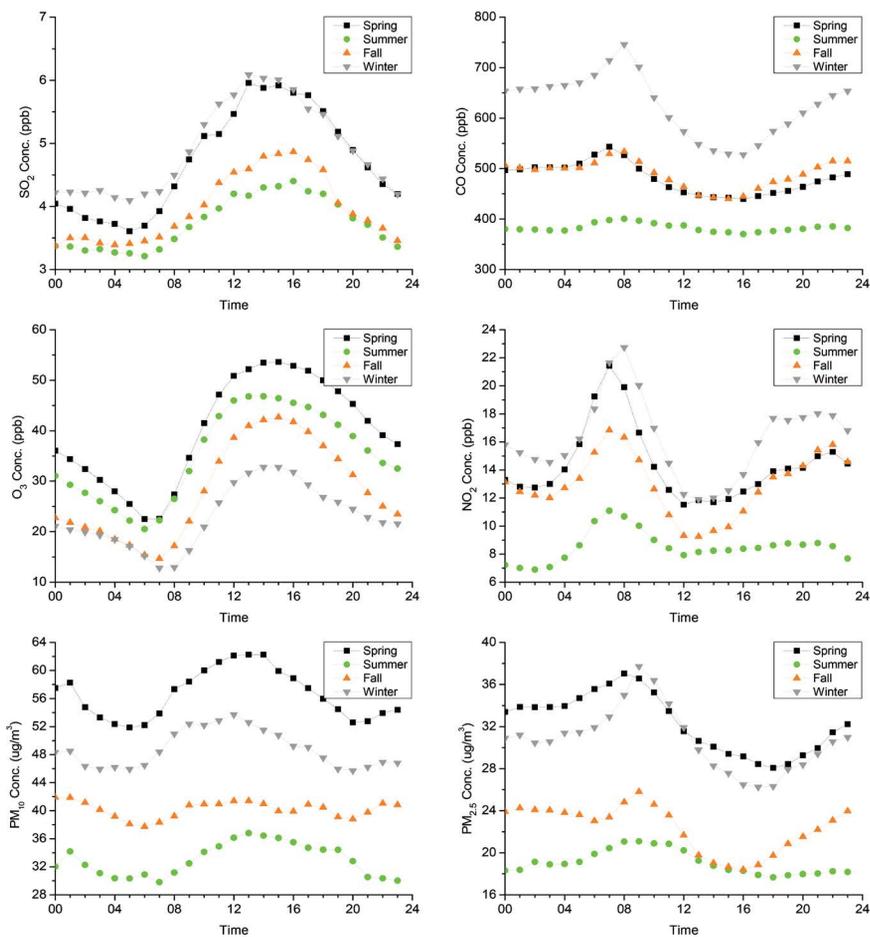


Fig. 4. The seasonal variation of air pollutants by time.

가장 풍부하고 온도가 높은 5~9월이다(Song *et al.*, 2001).

그림 4는 군산시 대기오염물질의 계절별 일중 시간 변화를 나타내었다. 봄은 검정, 여름 녹색, 가을 주황, 겨울은 회색으로 구분을 하였다. SO₂는 이른 새벽 0~4시와 밤 20~23시에 매우 낮은 농도를 보이며, 낮 12~2시 사이 하루 중 최고 농도를 보인 후 점차 농도가 감소하였다. O₃은 이른 새벽 5시와 밤 22시에 낮은 농도를 보이며, 이는 광화학 반응의 부재로 전구물질과 오존 생성이 거의 발생하지 않기 때문이다.

NO₂는 오전 5~7시와 저녁 8시에 최고 농도를 보이며, 오전 8시 이후부터 낮 12시까지 농도가 낮았다. 일반적으로 도심의 NO₂는 출근시간 오전 6~8시와 퇴근시간 밤 17~19시에 농도가 증가하는데, 이는 차량의 통행량에 따른 도로이동오염원의 배출량이 증가한 영향으로 판단된다. CO는 NO₂의 시간변화와 유사하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 오전 8시~낮 12시, 밤 20~22시에 고농도 변화를 보였다. 대기오염물질의 계절별 일중 변화는 SO₂와 NO₂는 가을>겨울>봄>여름에, CO는 겨울>가을>봄>여름, O₃은 봄>여름>겨울>가을, PM₁₀과 PM_{2.5}는 봄>겨울>가을>여름에 유사한 경향을 보였다.

3.4 군산시의 지역 대기질 특성

군산시와 익산시 도시대기 지역별 측정망을 토지별로 상업지역(신평동, 남중동), 주거지역(개정동, 모현동) 공단지역(소룡동, 팔봉동)으로 구분하였다. 군산시와 더불어 익산시를 연구지역으로 지정한 이유는 익산시는 전체 면적(506.54 km²)에서 농경지가 252.5 km²로 약 49.7%를 차지하며, 질산 비료, 농업부산물 소각, 가축에서 N₂O 등이 다량 발생하여 PM_{2.5}의 전구물질로 작용하여 영향을 받는 것으로 보인다. 최근 3년간 환경부가 2017년 전국 63개 도시별 PM_{2.5} 연평균 농도를 비교한 결과는 18 µg/m³에서 36 µg/m³이며, 익산시는 36 µg/m³로 가장 심한 도시로 나타났다. 익산시 상업지역(남중동) 2017년 자료는 결측값으로 인해 연구에서 제외하였다. 2019년 기준으로 인구수는

군산시 약 27만, 익산시 약 28만으로 나타났다. 지역별로 거주하고 있는 인구수는 군산시 신평동 7,527명, 개정동 3,006명, 소룡동 17,251명, 익산시 남중동 12,161명, 모현동 39,244명, 팔봉동 6,845명이다. 팔봉동을 제외한 모든 지역의 인구수는 익산시가 많은 것으로 나타났다.

지역별 연간 농도 평균값이 O₃은 소룡동 34.5 ppb, 팔봉동 31.3 ppb로 농도가 높게 나타나며, 모두 공단지역이다. SO₂와 PM₁₀은 군산시 소룡동 공단지역이 5.5 ppb와 46.7 µg/m³로 높게 나타나고 익산시는 남중동 상업지역에서 4.4 ppb, 52.0 µg/m³로 나타났다. CO와 PM_{2.5}는 군산시 신평동 주거지역 461.7 ppb, 43.9 µg/m³, 익산시는 CO가 팔봉동 공단지역 544.3 ppb와 PM_{2.5}는 남중동 상업지역 34.0 µg/m³로 나타나고 군산시와는 다른 변화를 보였다. NO₂는 신평동 14.0 ppb, 남중동 17.1 ppb로 높게 나타나며 군산시와 익산시 상업지역에서 높게 나타났다. 이는 차량의 이동량이 많은 상업지역에서 NO₂ 농도가 높게 나타나는 결과와 일치하는 부분이다. Ross *et al.* (2006)는 교통량이 많고 도시 길이가 길고, 해안으로부터 멀리 떨어질수록 NO₂ 농도가 증가하는 것으로 나타났다. SO₂와 PM₁₀은 군산시 공단지역(5.5 ppb, 46.7 µg/m³), 익산시는 상업지역(4.4 ppb, 52.0 µg/m³)에서 높게 나타내며, CO와 PM_{2.5}는 군산시 주거지역(461.7 ppb, 43.9 µg/m³), 익산시 CO는 공단지역(544.3 ppb), PM_{2.5}가 상업지역(34.0 µg/m³)이 높게 나타났다. 선행 연구 결과 Oh *et al.* (2016)는 울산지역 대기오염 공간분포 연구를 통해 도시대기 측정망 13곳의 대기오염물질 농도는 산업단지에서 SO₂ 4.6~17.0 ppb, CO 830 ppb, PM₁₀ 50~60 µg/m³로 높게 나타나고, NO₂의 경우 상업지역에서 29 ppb가 나타났다. 또한 Hwang and Ju (2011)도 대구지역 대기오염물질 공간분포 연구에서 대구지역 도시대기 측정망 10곳의 농도는 공업단지에서 SO₂ 7.5 ppb, CO 705.8 ppb, PM₁₀ 61.9 µg/m³, O₃은 상업, 주거, 공업지역(20.8~21.7 ppb)에서 비슷한 농도를 나타내며, NO₂는 차량 이동이 빈번한 상업지역에서 26.7 ppb로 높게 나타났다. 선행 연구 결과와

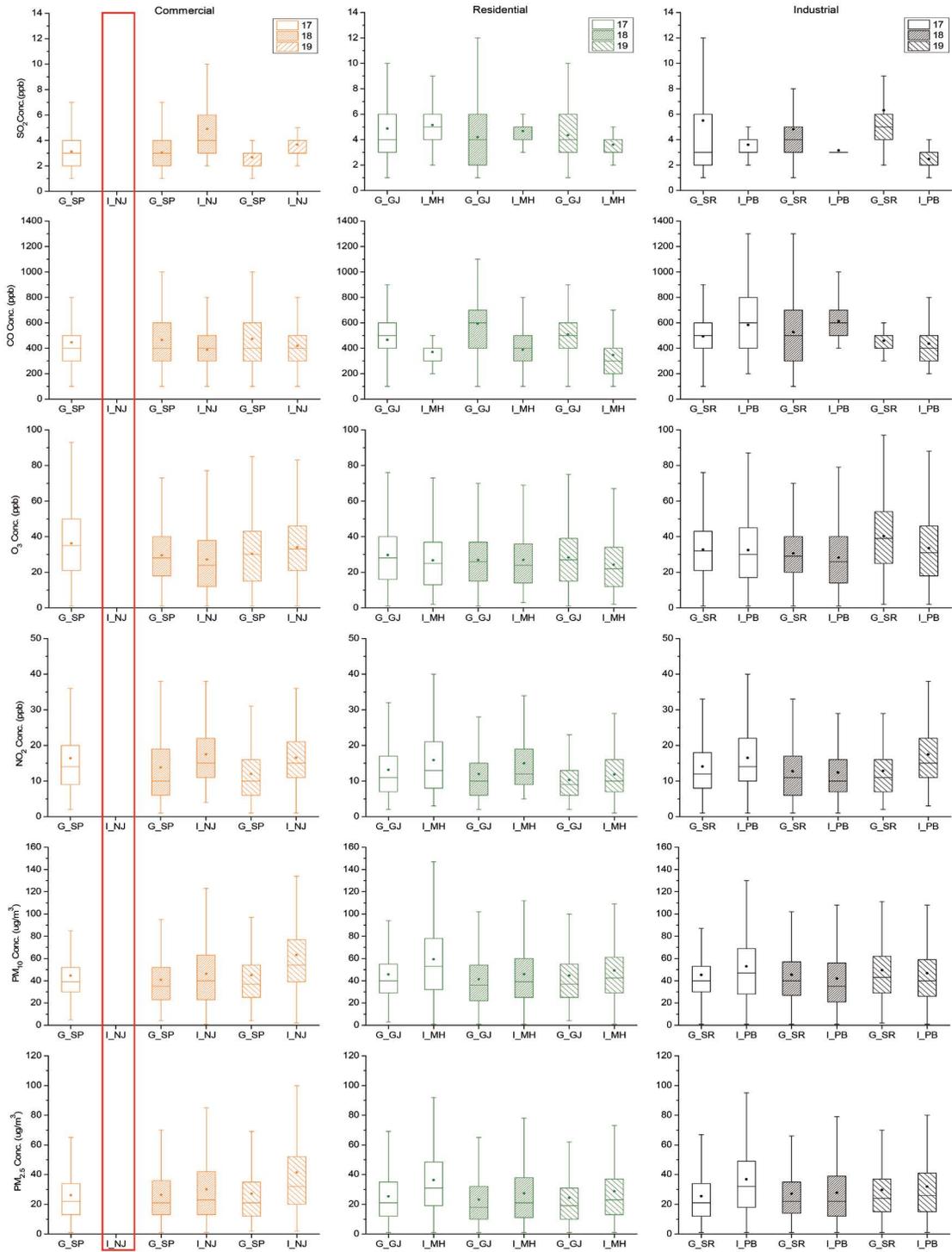


Fig. 5. Annual regional air pollutant characteristics of Gunsan and Iksan.

비교하면 O₃은 공단지역(34.5, 31.3 ppb)과 NO₂는 상업지역(14.1, 17.1 ppb)이 높게 나타났다. O₃과 NO₂는 공단지역, 상업지역에서 높게 나타난 결과와 일치하며, SO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도는 지역 특성에 따른 영향을 받은 것으로 판단된다.

그림 5는 군산시와 익산시 도시대기 지역별 측정망의 상업지역(신평동 G_SP, 남중동 I_NJ), 주거지역(개정동 G_GJ, 모현동 I_MH), 공단지역(소룡동 G_SR, 팔봉동 I_PB) 농도를 박스플롯으로 나타내었다. 상업지역 주황색, 주거지역 녹색, 공단지역은 회색으로 구분하였으며, 그림 안에 네모박스는 오염물질 농도의 각각 25%, 75% 수준을 나타내며, 실선은 중앙값, 동그라미는 평균값, 막대기는 각각 -1.5(최솟값), +1.5(최댓값)를 의미한다. SO₂는 군산시 공단>주거>상업, 익산시 주거>상업>공단이며, CO는 군산시 주거>상업>공단, 익산시 공단>상업>주거로 나타났다. O₃와 NO₂는 군산시와 익산시 농도는 동일한 변화를 보이고, PM₁₀은 군산시 공단>주거>상업으로 익산시는 상업>주거>공단이다. PM_{2.5}는 군산시 주거>공단>상업, 익산시 상업>공단>주거지역으로 나타났다. 이번 연구 결과에서는 군산시는 SO₂, O₃, PM₁₀의 농도가 공단지역에서 높게 나타나고, 익산시는 CO와 O₃ 농도가 높았다. 대기오염물질의 농도 차이는 도시 면적, 측정망의 위치, 기상조건, 이동오염원 및 지역적 특성에 따른 영향으로 판단된다. 또한 군산시는 도심 지형이 임야지대를 형성하고 익산시는 도심 지형이 주변에 바다·산·강이 없는 평야지대로 구성되어 있다. 이런 지형적인 차이도 두 지역 특성의

대기오염물질 농도의 차이가 생기는 것으로 판단된다. 일반적으로 공단지역이 위치한 지점에서 대기오염물질의 영향을 많이 받는 것으로 보이나, 연안지역에 위치한 대도시는 공단지역이 연안 부근에 밀집되어 있고, 오염원으로부터 배출된 공기는 야간에 육풍에 의해 해상으로 수송되고, 주간에는 다시 해풍에 의해 육상으로 이루어지는 경향이 있다(Shin *et al.*, 2007).

3.5 역궤적 모델(HYSPLIT-4)을 이용한 군집분석

역궤적 분석과 군집분석을 통해 군산시와 익산시로 유입되는 공기 기류의 발원지가 군산시는 2017년 4개, 2018년 6개, 2019년 5개, 익산시가 2017년 5개, 2018년 6개, 2019년 4개 군집으로 분류되었다(그림 6). 표 6은 2017년에서 2019년까지 군산시와 익산시의 군집분석 대기오염물질의 평균농도를 나타내었다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 군산시 45.2~45.7 µg/m³, 25.6~26.5 µg/m³로 익산시는 54.9~47.8 µg/m³와 35.5~29.4 µg/m³로 나타나며 전반적으로 높게 나타났다. 역궤적 모델(HYSPLIT-4)은 복잡한 지형이나 지역 특성, 계절별 기상 변화에 따른 변수가 발생하여, 결과의 오차가 생길 수 있으나, 관측지점에 도달한 궤적의 이동경로와 물질 농도의 상관성을 비교할 수 있다. 최근 연구 동향을 살펴보면, Hong and Song (2022)은 20년간 제주지역 오존의 장기변화 추세와 고농도 사례를 분석하였고, Lee and Lee (2021)는 충청북도 미세먼지 현황 및 오염원 분석에서 오염원 추적을 하였다. Park *et al.* (2021)은 광주광역시 대기 중 수용성 유·무기 입자

Table 6. Air pollutant concentration according to cluster analysis of Gunsan and Iksan in 2017~2019.

Gunsan		SO ₂ (ppb)	CO (ppb)	O ₃ (ppb)	NO ₂ (ppb)	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)
2017	Mean	4.5	470.66	32.86	14.57	45.26	25.68
2018	Mean	3.98	528.17	28.89	12.92	42.82	25.83
2019	Mean	4.43	477.48	33.1	11.68	45.71	26.53
Iksan		SO ₂ (ppb)	CO (ppb)	O ₃ (ppb)	NO ₂ (ppb)	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)
2017	Mean	4.37	477.42	29.72	16.17	54.94	35.58
2018	Mean	3.9	484.05	27.56	13.02	43.98	27.35
2019	Mean	3.03	390.61	28.75	14.59	47.81	29.84

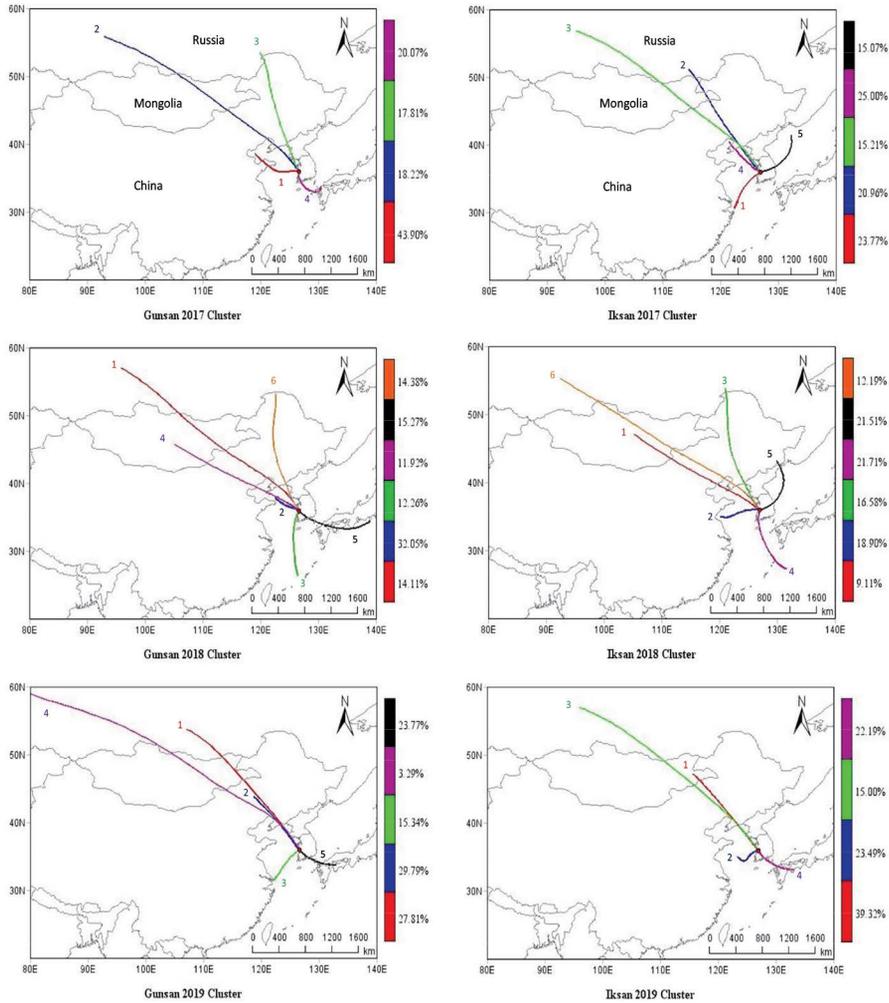


Fig. 6. Airflow pattern of 2017~2019 Gunsan and Iksan (cluster analysis).

의 크기분포 특성에서 외부 토양 먼지의 국내 유입 분석을 하였다. Cho and Song (2017)는 2010~2015년 전라북도 도시대기 PM₁₀의 특성 연구에서 HYSPLIT-4 모델을 이용하여 전주지역의 군집분석을 수행한 결과 러시아와 몽고, 중국 화중, 만주지역의 영향을 받은 것으로 나타났다. 2017년 군산시는 4개의 군집이 나타나며, 군집 1 (43.9%), 군집 2 (18.2%), 군집 3 (17.8%), 군집 4 (20.0%)를 차지하였다. 군집 1과 군집 2는 중국의 칭다오와 러시아에서 서풍 계열의 바람을 타고 유입되는 사례이며, 군집 3은 만주에서, 군집 4는 일본

을 지나서 군산시로 유입되었다. 2018년은 6개 군집이며, 군집 1 (14.1%), 군집 2 (32.0%), 군집 3 (12.2%), 군집 4 (11.9%), 군집 5 (15.2%), 군집 6 (14.3%)을 차지하였다. 군집 2와 군집 3은 각각 서해와 남해상에서 유입되며, 군집 4는 몽고 지역에서 유입되는 사례였다. 2019년에는 5개의 군집이 나타내며, 군집 1 (27.8%), 군집 2 (29.7%), 군집 3 (15.3%), 군집 4 (3.29%), 군집 5 (23.7%)를 차지하였다. 군집 2는 중국 내몽골에서 서풍 바람을 타고 유입이 되며, 군집 3은 중국 상하이 지역에서 유입이 되었다. 다른 지역 김해

지역 PM₁₀의 수송 경로를 살펴보기 위해 HYSPLIT 모델을 수행한 결과 4개의 군집이 나타나고, 대부분 중국으로부터 영향을 받는 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2013).

익산시는 군집을 통해 2017년 5개, 2018년 6개, 2019년 4개의 군집으로 분류되었다. 2017년 5개의 군집이 나타나며, 군집 1(23.7%), 군집 2(20.9%), 군집 3(15.2%), 군집 4(25.0%), 군집 5(15.0%)를 차지하였다. 군집 1은 서해상에서 익산시로 유입되는 사례이며, 군집 2는 만주에서 서풍 바람을 타고 유입되었다. 군집 3은 러시아에서 유입되었다. 군집 4는 중국의 베이징이며 가장 가까운 거리에서 유입되었다. 군집 5는 동해에서 한반도를 거쳐 익산시로 유입되는 사례이다. 2018년은 6개의 군집이 나타나며, 군집 1(9.11%), 군집 2(18.9%), 군집 3(16.5%), 군집 4(21.7%), 군집 5(21.5%), 군집 6(12.1%)을 차지하였다. 군집 1은 몽고에서 중국을 지나서 유입되는 사례이다. 군집 4는 남해에서 유입되었다. 2019년에는 4개의 군집이 나타나며, 군집 1(39.3%), 군집 2(23.4%), 군집 3(15.0%), 군집 4(22.1%)를 차지하였다. 군집 4는 일본에서 한반도를 지나서 유입되는 사례이다. 본 연구에서는 관측지점에 도달한 궤적의 이동 경로와 오염물질 농도의 상관성을 비교할 수 있다는 점이 기존 연구와의 차이점이라고 할 수 있다. 군산시와 익산시는 러시아 남부, 중국의 만주, 서해 및 중국의 동부, 몽골 지역의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타나며, 지역 간의 뚜렷한 차이는 없었다.

4. 결 론

군산시 지역별 주요 대기오염물질 농도 특성을 익산시 지역 대기오염물질 농도 특성과 비교하였으며, 역궤적 모델(HYSPLIT-4)을 활용하여 군산시와 익산시의 공기 기류패턴과 오염원 발원지의 연관성을 연구하였다.

군산시의 대기오염물질은 2017년에서 2019년까

지 NO₂(14.6 ← 11.7 ppb), SO₂(4.5 ← 4.4 ppb), PM₁₀(45.3 ← 44.6 µg/m³)은 감소하며, CO(470.9 → 477.8 ppb), O₃(32.8 → 33.1 ppb), PM_{2.5}(25.7 → 26.0 µg/m³)로 증가하는 경향을 보였다.

2017년부터 2019년의 대기오염물질 월별 변화는 SO₂, CO, NO₂의 경우 1~2월(5.1~5.7 ppb, 602.8~593.9 ppb, 16.0~14.1 ppb), O₃ 5~6월(39.9~38.8 ppb), PM₁₀ 3~5월(53.4~49.7 µg/m³), PM_{2.5} 1~3월(29.9~36.9 µg/m³)이 가장 높고, 7~8월은 모든 대기오염물질의 평균값이 다른 월별에 비해 낮았다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 황사로 인해 3~5월에 가장 높은 농도를 보였다.

대기오염물질 계절별 변화를 분석한 결과, SO₂와 NO₂는 가을>겨울>봄>여름, CO는 겨울>가을>봄>여름, O₃은 봄>여름>겨울>가을, PM₁₀과 PM_{2.5}는 봄>겨울>가을>여름으로 나타났다.

SO₂와 PM₁₀은 군산시 공단지역(5.5 ppb, 46.7 µg/m³), 익산시는 상업지역(4.4 ppb, 52.0 µg/m³)에서 높게 나타났다. CO와 PM_{2.5}는 군산시 주거지역(461.7 ppb, 43.9 µg/m³), 익산시 CO는 공단지역(544.3 ppb), PM_{2.5}가 상업지역(34.0 µg/m³)이 높게 나타났다. O₃은 공단지역(군산시 34.5 ppb, 익산시 31.3 ppb)이 농도가 높고 NO₂는 상업지역(군산시 14.0 ppb, 익산시 17.1 ppb)이 높게 나타났다.

역궤적 모델(HYSPLIT-4)을 이용한 군집분석은 군산시가 2017년 4개, 2018년 6개, 2019년 5개, 익산시는 2017년 5개, 2018년 6개, 2019년 4개의 군집으로 분류되었다. 군산시와 익산시는 러시아 남부, 중국의 만주, 중국의 동부, 몽골 지역의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타나며, 지역 간의 뚜렷한 차이는 없었다. 군집 분석의 경우 기류에 따른 오염원 이동 중심적인 모델로 이동하면서 발생하는 입자상 물질의 물리적, 화학적 변화에 대한 파악이 어렵다. 추후 연구에서는 전라북도 대기오염물질 농도와 배출량 자료, 오염원 추적 모델인 CWT와 PSCF 모델을 활용하여 지역 특성 연구를 진행하여 분석하고자 한다. 특히 익산지역의 PM_{2.5}의 전구물질들의 영향을 조사하고 군산시에 미치는 영향을 연구할 계획이다. 이번 연구를 통해 향후

군산시의 대기환경관리 및 대기질 기초자료로 제공하여, 해당 지역의 주민 건강과 대기질 평가에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 “군산대학교 2021년 교수연구년 지원”에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Cho, B.S., Song, M.J. (2017) Distributions and Origins of PM₁₀ in Jeollabuk-do from 2010 to 2015, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 251-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.251>
- Choi, C.K., Yoo, S.Y., Jeon, B.K. (2000) A Study on the Characteristics of Concentrations of Atmospheric Aerosols in Pusan, *Korean Journal of Environmental Health Society*, 26, 41-48, (in Korean with English abstract).
- Chung, T.H., Kim, S.M., Mun, S.H., Hong, H.K., Lee, S.H., Seo, S.J., Kim, J.H., Jung, S.W., Kim, I.G., Lee, J.C., Lee, J.T. (2019) A Study on NO₂/NO_x Ratio and NO_x Emission Characteristics of Heavy-Duty Diesel Vehicles, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 41(4), 221-227, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2019.41.4.221>
- Deng, Q., Deng, L., Miao, Y., Guo, X., Li, Y. (2019) Particle deposition in the humanlung: Health implications of particulate matter from different sources, *Environmental Research*, 169, 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.014>
- Hong, S.O., Song, S.K. (2022) Analysis of Long-term Variation Trends of Ozone the in the Past 20 Years and Recent High Concentration Cases on Jeju Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(1), 138-158, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.138>
- Hwang, I., Cho, Y.H., Choi, W.G., Lee, H.M., Kim, T.O. (2008) Quantitative estimation of PM-10 source contribution in Gumi city by the positive matrix factorization model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(1), 100-107, (in Korean with English abstract).
- Hwang, I.J., Ju, J.H. (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>
- Kim, D.H., Son, Y.S. (2020) Spatial-temporal Variations in Air Pollution in Busan Metropolitan City (2010-2018), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 309-328, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.309>
- Kim, D.S., Ma, H. (2009) Characteristics of Air Quality in the West-coastal Urban Atmosphere, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(6), 550-561, (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Lovell, S.J., O'Farrell, J., Cho, Y.S. (2008) The Measures of Ozone Pollution: An Analysis of Ozone Concentration Data in USA, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2(1), 47-53. <https://doi.org/10.5572/ajae.2008.2.1.047>
- Kim, M.K., Lee, H.W., Jung, W.S., Do, W.G. (2012) Analysis on the Effect of Meteorological Factors related to Difference of Ozone Concentration at the Neighboring Areas in Gijang Busan, *Journal of Environmental Science International*, 21(9), 1097-1113, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.9.1097>
- Kim, Y.P. (2006) Air pollution in Seoul caused by aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 535-553, (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022) <https://www.weather.go.kr> (accessed on Apr 04, 2022).
- KOrean Statistical Information Service (KOSIS) (2022) <https://kosis.kr> (accessed on Mar 03, 2022).
- Lee, J.Y., Lee, S.S. (2021) Analysis of the current state of fine dust and pollution sources in Chungcheonbuk-do, *Journal of the Institute of Construction Technology*, 40(1), 35-43.
- Ministry Of the Interior and Safety (MOIS) (2022) <https://www.mois.go.kr/srch.jsp> (accessed on Mar 03, 2022).
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022) <https://www.air.go.kr> (accessed on Apr 04, 2022).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) Annual Report of Air Quality in Korea 2017.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Annual Report of Air Quality in Korea 2018.
- Oh, I.B., Bang, J.H., Kim, S.T., Kim, E.H., Hwang, M.K., Kim, Y.H.

- (2016) Spatial Distribution of Air Pollution in the Ulsan Metropolitan Region, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 394-407, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.394>
- Oh, M.-S., Lee, T.-J., Kim, D.-S. (2009) Characteristics of ionic components in size-resolved particulate matters in Suwon area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(1), 46-56.
- Park, J.K., Jung, W.S., Lee, B.R., Kim, E.B. (2013) Analysis on the PM₁₀ Transportation Route in Gimhae Region Using the HYSPLIT Model, *Journal of Environmental Science International*, 22(8), 1043-1052, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2013.22.8.1043>
- Park, T.E., Son, S.C., Park, S.S. (2021) Mass Size Distributions of Water-soluble Organic and Inorganic Species in Ambient Air at an Urban Site in Gwangju during November 2019, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 66-79, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.066>
- Ross, Z., English, P.B., Scalf, R., Gunier, R., Smorodinsky, S., Wall, S., Jerrett, M. (2006) Nitrogen dioxide prediction in Southern California using land use regression modeling: potential for environmental health analyses, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 16, 106-114.
- Seo, W.M., Shon, Z.H., Song, S.K. (2012) Characteristics of the Emissions and Concentrations of Air Pollutants with Change in Traffic Volume during the Beach Opening Period in Busan, *Journal of Environmental Science International*, 21(9), 1149-1162. <https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.9.1149>
- Shin, M.K., Lee, C.D., Ha, H.S., Choe, C.S., Kim, Y.H. (2007) The Influence of Meteorological Factors on PM₁₀ Concentration in Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(3), 322-331, (in Korean with English abstract).
- Song, S.K., Kim, Y.K., Oh, I.B. (2001) Characteristics and mechanisms of Tropospheric Ozone Enhancement in Springtime, *Proceeding of the 32nd Meeting of KOSAE*, pp. 75-76. Korean Society of Atmospheric Environment.

Authors Information

- 박상훈 (국립군산대학교 환경공학과 박사과정)
(psh1207@kunsan.ac.kr)
- 김성천 (국립군산대학교 환경공학과 교수)
(ksc@kunsan.ac.kr)
- 김득수 (국립군산대학교 환경공학과 교수)
(dskim@kunsan.ac.kr)