

논문

ED-XRF를 이용한 장거리 이동 원소 성분 분석 및 계절별 농도 특성 분석 - 전라북도 부안 및 고창지역 동시 측정 중심

Long-Range Elemental Composition Analysis and Seasonal Concentration Characteristics Using ED-XRF: Simultaneous Measurements in Buan and Gochang, Jeollabuk-do

전하정, 송명기, 오세호, 고동훈, 유근혜, 최서영, 박채형, 김민욱^{1)*}, 배민석*

국립목포대학교 환경공학과, ¹⁾국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과

Hajeong Jeon, Myoungki Song, Sea-Ho Oh, Dong-Hoon Ko, Geun-Hye Yu, Seoyeong Choe, Chaehyeong Park, Minwook Kim^{1)*}, Min-Suk Bae*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Muan, Republic of Korea

¹⁾Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Republic of Korea

접수일 2024년 5월 30일
수정일 2024년 6월 5일
채택일 2024년 6월 11일

Received 30 May 2024
Revised 5 June 2024
Accepted 11 June 2024

*Co-corresponding author
Tel : +82-(0)61-450-2485
E-mail : minsbae@mnu.ac.kr
Tel : +82-(0)63-238-2491
E-mail : minuk09@korea.kr

Abstract The trace elements of PM_{2.5} in agricultural areas were analyzed by simultaneously measuring concentrations in a paddy field region (Buan, Jeollabuk-do) and an upland field region (Gochang, Jeollabuk-do) over a one-year period from March 1, 2023, to February 29, 2024, encompassing all four seasons. In addition, high concentration events observed during the study period were analyzed to differentiate long-range transport. Increases in Ba, Ti, Ni, V, As, Cu, Zn, and Pb in PM_{2.5} were observed due to long-range transport. Based on ECMWF Reanalysis v5 and Residence Time Weighted Concentration (RTWC), these inflows were influenced by westerly winds affecting the study area, with specific contributions from northern and northwestern China. Analysis of air pollutants in the agricultural regions showed that PM₁₀ concentrations were approximately 25~35 µg/m³, while PM_{2.5} concentrations ranged from about 12~20 µg/m³. In addition, gaseous pollutants such as NH₃ were influenced not only by agricultural activities but also by livestock activities in the agricultural regions. SO₂ concentrations were found to be higher in paddy farming areas compared to upland farming areas. These results provide insights into the characteristics of air pollutants in agricultural regions and the general characteristics of long-range transport.

Key words: Agricultural particulate matter, Trace elements, XRF

1. 서 론

전 세계적으로 산업화 및 도시화 과정을 통해 지속적으로 대기오염물질이 늘어나고 있으며, 전 세계 사망자 9명 중 1명은 대기오염물질 초미세먼지(PM_{2.5})와 연관이 있는 것으로 나타난다(Zhou *et al.*, 2018; WHO, 2016). 대기오염물질은 인간, 동물 및 식물에 악영향을 미칠뿐만 아니라 환경 가시성과 기후변화

등 환경적으로도 큰 영향을 미친다(Menon *et al.*, 2002). 이처럼 인체 및 환경에 악영향을 미치는 대기오염물질은 다양한 인위적 활동에 의해 배출된다. 대표적으로 도시지역의 경우 차량 이동에 의한 엔진 배기가스 및 PM_{2.5} 배출 등이 주요 대기오염물질로 지목되며, 산업단지는 제조 업종에 따라 제철단지는 중금속, 석유화학단지는 휘발성유기화합물, 화력발전소의 경우 비소 및 블랙카본 등의 대기오염물질을 배

출한다(Yu *et al.*, 2024a; Song *et al.*, 2023; Park *et al.*, 2021; Sicard *et al.*, 2020; Menon *et al.*, 2002).

대기오염물질에 대한 인체 및 환경 영향을 고려하여 배출원을 중심으로 다양한 저감 대책을 마련하고 있다. 일례로 도시지역 대기오염물질을 관리하기 위해 주요 배출원인 교통량과 관련된 정책을 수립하고 있으며, 지역별 산업시설에 대한 관리 방안을 강구하고 있다. 하지만 대기오염물질은 수질 및 토양 오염과 달리 정제되어 있지 않으며, 다양한 대기 활동에 의해 확산되어 단거리 및 장거리 지역에 큰 영향을 미친다. 따라서 대기오염물질의 관리는 지역 내 배출원만을 관리하는 것으로는 부족하다. 최근 연구에 따르면 도시지역과 농업지역은 발생하는 대기오염물질의 특성이 다르며, 발생하는 대기오염물질의 양방향간 영향으로 인하여 도시지역 인체 위해성 증가 및 농업지역 작물 생산 등에 악영향을 미치는 것으로 나타난다(Agrawal *et al.*, 2003; Marshall and Te-Lintelo, 2001). 또한 우리나라 국토 면적을 구분할 경우 크게 도시지역과 비도시지역으로 구분되며, 도시지역은 국토 면적 106,176.4 km² 중 16.6%에 불과하다(Sin and Sin, 2021). 반면 비도시지역 중 인간활동이 가능한 농업지역은 2020년 기준 국토 면적의 46.4%를 차지하고 있어 도시지역과 비교하여 그 면적이 약 3배 이상 크다. 즉, 토지 면적을 기준으로 평가할 경우 도시지역에 대한 농업지역 대기오염물질의 영향이 높을 수 있다. 따라서 도시지역 등에 대한 대기오염물질을 관리하기 위해서는 농업지역 대기오염물질의 특성을 이해하는 것이 중요하다.

인간활동에 의한 농업지역 대기오염물질의 배출은 농업활동, 농업 부산물의 소각, 축사 발생 및 소규모 산업단지 발생 등이 있다(Guo *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2017; Aneja *et al.*, 2009). 세부적으로 농업활동에서 생산성 증대를 위해 사용되는 비료로부터 N₂O, NO_x, NH₃ 등의 질소화합물이 대기로 배출되며, 대규모 동물 사육을 위한 축사로부터 NH₃ 등이 배출된다(Wang *et al.*, 2023; Salthammer and Gunschera, 2021; Xu *et al.*, 2020; Frank *et al.*, 2019). 특히 일부 연구에

서는 축사 및 농업활동으로부터 발생하는 2차 생성 전구물질인 NH₃가 국가 전체 NH₃ 배출원의 80%를 차지하고 있는 것으로 나타나 농업지역에서 발생하는 NH₃가 대기오염물질 관리에 매우 중요하다(Yu *et al.*, 2024b; Guo *et al.*, 2022; Ti *et al.*, 2022; Wyer *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2012). 농업 부산물 및 논두렁, 밭두렁 소각은 미량 유해가스, NH₃, 유기 및 무기탄소 에어로졸 등의 중요한 배출원으로 지목되며, 소규모 산업단지는 업종 특성에 기반한 다양한 대기오염물질을 배출한다(Song *et al.*, 2024, 2022, 2020a; Li *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2013). 이처럼 농업지역의 인간활동에 의해 배출되는 대기오염물질은 매우 다양하며 발생량 역시 높을 뿐만 아니라 농업지역에서 배출되는 대기오염물질은 인근 지역으로 영향을 주고 있다.

농업지역의 대기오염물질은 지역적 발생 외에도 장거리 외부 유입에 의한 영향 역시 받고 있다. 특히, 농업지역에서 주로 배출되는 NH₃는 장거리 외부 유입으로부터 우리나라로 유입된다는 특성이 있다(Song *et al.*, 2020b). 세부적으로 장거리 외부 유입으로 인해 PM_{2.5} 내 NH₄⁺와 NO₃⁻는 약 6배, NH₃는 약 2배 이상 증가한다(Song *et al.*, 2020b). 즉, 장거리 외부 유입은 질소산화물 및 NH₃ 등 주요 농업지역에서 배출되는 대기오염물질을 함유하고 있다. 따라서 농업지역에서 배출되는 대기오염물질과 장거리 외부 유입에 따른 대기오염물질을 구분하는 것은 쉽지 않은 일이다. 하지만 장거리 외부 유입과 농업지역에서 배출되는 대기오염물질을 정량적으로 구분하는 것은 농업지역 대기오염물질을 관리하기 위해 매우 중요한 요소이다.

이에 본 연구에서는 농업지역 대기오염물질을 관측하고, PM_{2.5} 내 원소 농도를 기준으로 장거리 유입과 이외 기간을 구분하여, 지역 발생 대기오염물질 특성을 분석하였다. 이를 위하여 전라북도 부안 및 고창지역에 측정소를 설치하여 1년 동안 단일원소 성분을 동시에 분석하였으며, 장거리 유입 및 지역발생 기간을 구분하여, 대기오염물질 특성을 나타냈다.

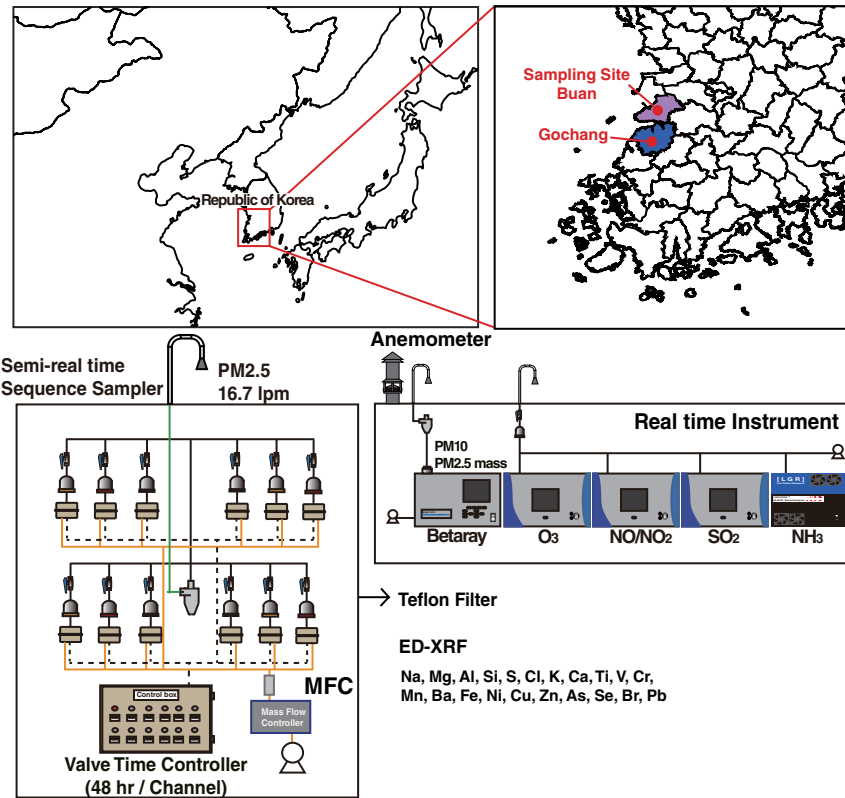


Fig. 1. Measurement Locations in Rice Fields (Buan) and Field Areas (Gochang) in Jeollabuk-do Using a 12-Channel PM Sequence Sampler and Gaseous Monitoring Instruments for Air Pollution Analysis.

연구 결과는 농업지역 대기오염물질 특성뿐만 아니라 장거리 유입에 의해 변화되는 농업지역의 대기오염물질 변화를 제시하며, 장거리 외부 유입에 의한 대기오염물질을 판정할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 측정 장소

본 연구에서는 농업지역 $PM_{2.5}$ 단일원소 성분을 분석하고자 논지역(rice area) (전북 부안군 계화면 간재로 692, 식량원 계화도 시험지) 및 밭지역(field area) (전북 고창군 대산면 칠거리로 70, 고창기상대표기상관측소)에서 2023년 3월 1일부터 2024년 2월 29일까

지 총 1년 4계절 동안 동시에 측정하였다(그림 1). 연구기간 동안 전구 물질 가스상 성분 측정 및 분진 포집을 위해 부안과 고창 측정지점에 컨테이너형 측정소를 2개씩(총 4개소) 설치 하여 운영하였다. 본 연구는 단일원소 성분 분석을 위해서 자체 제작한 $PM_{2.5}$ 자동 포집기를 이용하여, 유량 16.7 liter per minute (lpm) 조건하에 48시간 동안 47 mm 테프론 필터 (PTFE, R2PJ047, Pall Corp., USA)에 연속 포집하였다. 시료는 매월 1일부터 24일까지 각 측정소당 12개 시료를 포집하였다. 자세한 지역적 설명은 선행연구에 나타내었다(Song *et al.*, 2024).

2.2 전구가스상 성분 실시간 측정

농업지역에서 발생하는 $PM_{2.5}$ 내 단일원소 성분 특

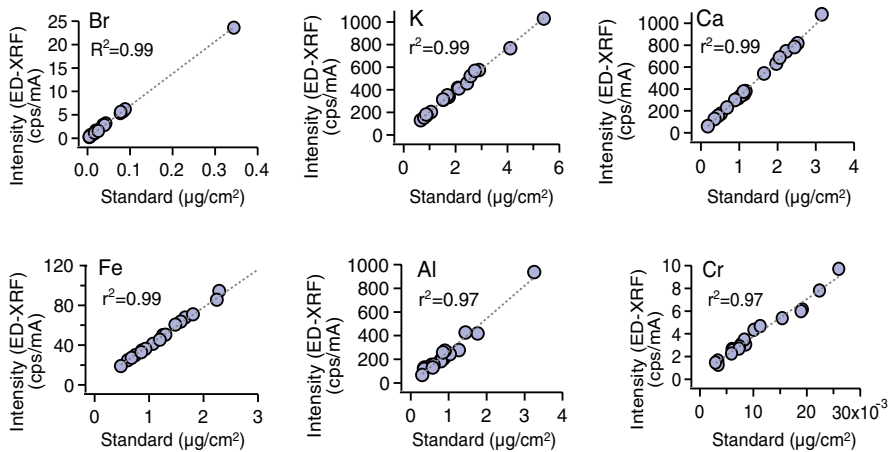


Fig. 2. Standard Curves of Al, K, Ca, Fe, Br, and Cr Using ED-XRF for Air Pollution Analysis.

성과 상관성을 분석하기 위해, 실시간 질량 측정기인 베타레이 방식의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} (Spirant BAM 1020, Met One Instruments Inc., USA)를 사용하였다. 또한, 가스상 성분으로는 NH₃ (cavity ring-down spectroscopy, CRDS G2013), NO (Serinus[®] 40, Ecotech ACOEM Group, Australia), SO₂ (Serinus[®] 50, Ecotech ACOEM Group, Australia), O₃ (Serinus[®] 10, Ecotech ACOEM Group, Australia)를 실시간으로 측정하였다. PM₁₀ 및 PM_{2.5}는 측정 시작 전에 한국산업기술시험원에서 등가성 및 정도 검사를 마쳤으며, 매월 표준가스를 이용하여 가스상 측정기를 교정하였다. 가스상 측정기는 5분 간격으로 데이터를 산출하여, 검교정 기간 및 이상치 제거 후 1시간 내 50% 이상의 유효 자료에 대해 1시간 평균값을 나타냈다.

2.3 ED-XRF를 이용한 원소성분 분석

본 연구는 테프론필터 내 포집된 PM_{2.5} 단일원소 성분 분석에 대해서 에너지분산 X-선 형광분석법(Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer, ED-XRF (ARL QUANT'X EDXRF Spectrometer, Thermo. Inc., USA))을 이용하여, 총 21성분(Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ba, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Pb)을 분석하였다. 선행연구에 자세한 분석법을 나타냈다(Lee *et al.*, 2020). 간략히, Ni, Cu, Zn, Fe 경우 Mid

Zb 상태에서 간섭필터(Pd Medium) 및 20 kV, Na, Mg, Al, Si, S는 Low Za II 상태에서 C Thin 필터 7 kV, 그리고 Ti, V, Cr, Mn, Ba 성분은 Al 필터 조건에서 12 kV를 이용하여 분석하였다. 위 조건을 이용하여 그림 2에 본 연구에 활용된 검량선을 나타냈다. 단일원소의 총 농도를 추정하고자, ED-XRF로 분석된 주요 지각 요소인 Al, Fe, Mg, Ti, Ca 및 K 등의 원소 산화물(metal oxides)의 합을 밀의 선행 연구 계산식(1)을 이용하였다(Bae *et al.*, 2006).

$$\begin{aligned} \text{Metal Oxides } (\mu\text{g}/\text{m}^3) &= 1.348 \times \text{Na} + 1.658 \times \text{Mg} \\ &+ 1.889 \times \text{Al} + 1.205 \times \text{K} + 1.400 \times \text{Ca} \\ &+ 1.582 \times \text{Mn} + 1.430 \times \text{Fe} \end{aligned}$$

2.4 ERA5 and Residence Time Weighted Concentration

본 연구에서 ECMWF Reanalysis v5(ERA5)를 이용하여 장거리 오염물질의 이동을 분석하였다. ERA5는 평면 2차원 공간 바람 및 바람의 세기를 동시에 나타낼 수 있는 기상자료이며, 중장거리 오염 물질 이동 등 기상 조건을 동시에 분석할 수 있다. 더 나아가 분석된 단일원소 농도를 이용하여, Residence Time Weighted Concentration (RTWC)를 계산하였다. RTWC는 각 격자 셀에 가중 농도를 적용하여 평균

농도를 제공함으로써 단순 역귀적 모델보다 배출원 지역을 이해할 수 있다. 이에 대한 계산 방법에 대해서 선행연구에 자세히 나타냈다(Oh *et al.*, 2023).

3. 결 과

3.1 연구 지역 입자상 성분 농도 및 고농도 사례 분석

연구기간 관측된 농업지역 대기오염물질의 평균 농도를 표 1에 나타내었다. 부안지역 입자상 물질의 평균 농도는 PM₁₀ 38.4 µg/m³, PM_{2.5} 20.1 µg/m³으로 나타나 PM₁₀이 PM_{2.5}와 비교하여 약 1.9배 높았다.

Table 1. Summary statistics of average concentrations of measured species in rice (Buan) field (Gochang) areas of Jeollabuk-do during the measurement period.

Class	Compound	Unit	Buan	Gochang
PM	PM ₁₀	µg/m ³	38.4 ± 22.5	30.3 ± 20.6
	PM _{2.5}	µg/m ³	20.1 ± 10.6	14.4 ± 8.8
	Metal Oxides	µg/m ³	1.6 ± 2.1	1.0 ± 1.3
Gas	NH ₃	ppb	20.5 ± 8.9	28.2 ± 10.5
	NO	ppb	1.6 ± 0.7	1.6 ± 0.4
	SO ₂	ppb	3.2 ± 0.8	1.6 ± 0.6
	O ₃	ppb	36.5 ± 10.6	33.8 ± 8.8

고창지역의 입자상 물질 농도는 PM₁₀이 PM_{2.5}의 약 2.10배 높았으며, 입자상 물질의 농도가 부안지역과 비교하여 약 75% 수준이었다. 부안의 PM₁₀ 농도는 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)의 농도가 각각 57.8, 24.0, 32.3, 37.5 µg/m³이었으며, PM_{2.5} 농도는 봄 25.6 µg/m³, 여름 14.7 µg/m³, 가을 16.7 µg/m³, 겨울 22.9 µg/m³으로 나타났다(표 2). 부안지역과 고창지역의 입자상 물질의 농도는 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두에서 봄이 가장 높았다. 부안지역의 봄과 이외 계절을 비교할 경우 PM₁₀은 봄이 이외 지역과 비교하여 약 1.9배 높았으며, PM_{2.5}는 1.4배 높았다. 고창지역은 타 계절과 비교하여 봄이 PM₁₀ 2.17배, PM_{2.5} 1.46배 높게 나타났다.

특히 봄철 높은 PM₁₀ 농도는 영농작업 중 객토작업에 의한 입자상 물질의 증가가 한 원인으로 판단되며(Chen *et al.*, 2017; Pattey and Qiu, 2012; Aneja *et al.*, 2009), 그 다음으로, 장거리 이동 물질이 유입될 경우로 분류할 수 있다(Hellack *et al.*, 2015; Valenzuela *et al.*, 2012; Uygur *et al.*, 2010; Ryall *et al.*, 2002). 이에, 약 50 km 정도 떨어져 있음에도 불구하고, 두 측정소 모두 동시에 증가하는 3월 23~24일, 4월 11~18일, 4월 21일~24일 및 5월 21~24일을 event period로 선정하였다. event period 동안에 metal oxides의 상관

Table 2. Seasonal average concentrations in rice (Buan) field (Gochang) areas of Jeollabuk-do during the measurement period.

Site	Class	Compound	Unit	Spring	Summer	Autumn	Winter	
Buan	PM	PM ₁₀	µg/m ³	57.8 ± 28.0	24.0 ± 8.3	32.3 ± 9.3	37.5 ± 19.6	
		PM _{2.5}	µg/m ³	25.6 ± 12.2	14.7 ± 5.9	16.7 ± 5.9	22.9 ± 12.3	
		Metal Oxides	µg/m ³	3.6 ± 3.3	0.9 ± 0.5	0.8 ± 0.3	1.3 ± 1.1	
	Gas	NH ₃	ppb	24.1 ± 9.0	20.0 ± 6.7	20.3 ± 7.8	17.5 ± 10.4	
		NO	ppb	1.4 ± 0.8	1.5 ± 0.4	1.7 ± 0.3	1.8 ± 0.9	
		SO ₂	ppb	3.6 ± 0.9	3.5 ± 0.7	2.6 ± 0.5	3.1 ± 0.8	
		O ₃	ppb	43.7 ± 7.9	37.1 ± 13.5	33.1 ± 6.7	31.4 ± 7.7	
	Gochang	PM	PM ₁₀	µg/m ³	51.1 ± 25.7	17.3 ± 7.7	23.8 ± 7.8	29.5 ± 17.0
			PM _{2.5}	µg/m ³	18.8 ± 9.1	8.8 ± 4.9	11.7 ± 5.0	18.0 ± 10.4
			Metal Oxides	µg/m ³	2.6 ± 2.1	0.5 ± 0.3	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.9
Gas		NH ₃	ppb	30.5 ± 11.7	27.2 ± 6.8	29.2 ± 12.3	20.3 ± 6.8	
		NO	ppb	1.7 ± 0.7	1.5 ± 0.2	1.7 ± 0.4	1.6 ± 0.3	
		SO ₂	ppb	1.8 ± 0.3	0.8 ± 0.4	1.7 ± 0.4	2.0 ± 0.6	
		O ₃	ppb	41.0 ± 7.9	33.4 ± 10.6	30.3 ± 5.1	30.5 ± 5.8	

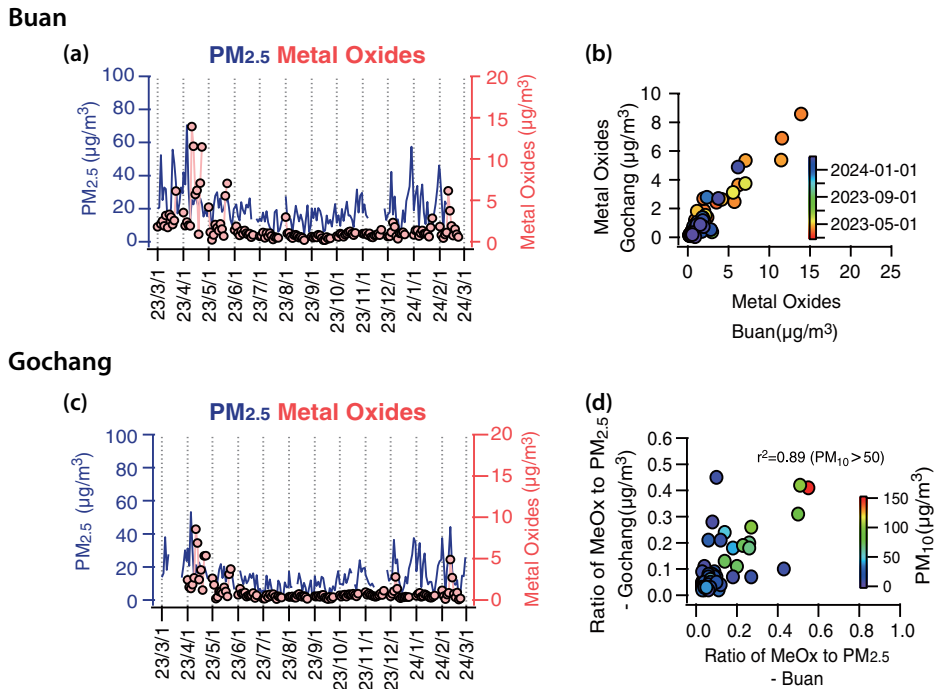


Fig. 3. Time Series Analysis of PM_{2.5} and Metal Oxides Concentrations in Jeollabuk-do: (a) Rice Field Area (Buan) and (c) Field Area (Gochang), (b) scatter Plot of Metal Oxides Concentrations between Gochang and Buan, and (d) scatter Plot of the Ratio of Metal Oxides to PM_{2.5} between Gochang and Buan.

관계 결정계수 (r^2)가 0.91로 높게 나타났다(그림 3(b)). 이는 event period에 각 지역적 영향이 아닌, 장거리 이동 배출원에 영향을 받았을 것으로 판단된다. 그림 3에 나타난 바와 같이 PM_{2.5} 내 metal oxides는 부안지역 event period에 $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 이외 기간은 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 고창지역 event period에 $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 이외 기간 $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 부안지역은 논농사 지역이며, 고창지역은 밭농사 지역으로 구분되며, 부안지역의 객토 시기는 1~2월, 파종 시기 4~5월인 반면, 고창의 대표 재배작물인 수박의 경우 객토 시기는 11~12월에 이루어진다(<https://www.nongsaro.go.kr>).

장거리 외부 유입은 대기오염물질 중 입자상 물질 및 가스상 물질의 증가 현상을 나타내며, 특정 일을 기준으로 광범위한 지역에 영향을 준다(Song *et al.*, 2022, 2020b). 부안 및 고창 관측지점은 event period을 기준으로 입자상 물질이 고농도가 증가하였다. 또한 분석된 원소 성분을 기준으로 event period에 Na,

Mg, Al, Ti, Ba, V의 성분이 부안과 고창에서 모두 증가하였다. 그림 3에서와 같이 PM_{2.5}에 함유된 metal oxide는 PM₁₀의 농도가 증가할 경우 r^2 가 증가한다는 특성을 보였다.

Event period에 ERA5 모델 및 RTWC를 분석하였다. 그림 4의 ERA5는 event period에 대한 결과를 보여주며, 그림에서와 같이 바람장, 기상장을 기준으로 event period에 연구 지역은 서풍에 의한 중국의 영향을 받고 있다. RTWC 모델은 각 그리드 셀에 대해 각각의 평균 농도가 계산되도록 각 그리드에 소스별 각종 농도를 부과하는 방법이다(Seibert *et al.*, 1994). 그림 5는 event period에 대한 RTWC 모델 결과를 보여주며, 그림에서와 같이 event period에 연구 지역은 서풍에 의한 중국의 영향을 받고 있다. 다만 부안과 고창의 서풍에 의한 영향 차이는 관측지점의 위치 차이에 기인된 것으로 판단되며, 실제 고창 관측지점은 부안 관측지점과 비교하여 보다 내륙에 위치해 있다.

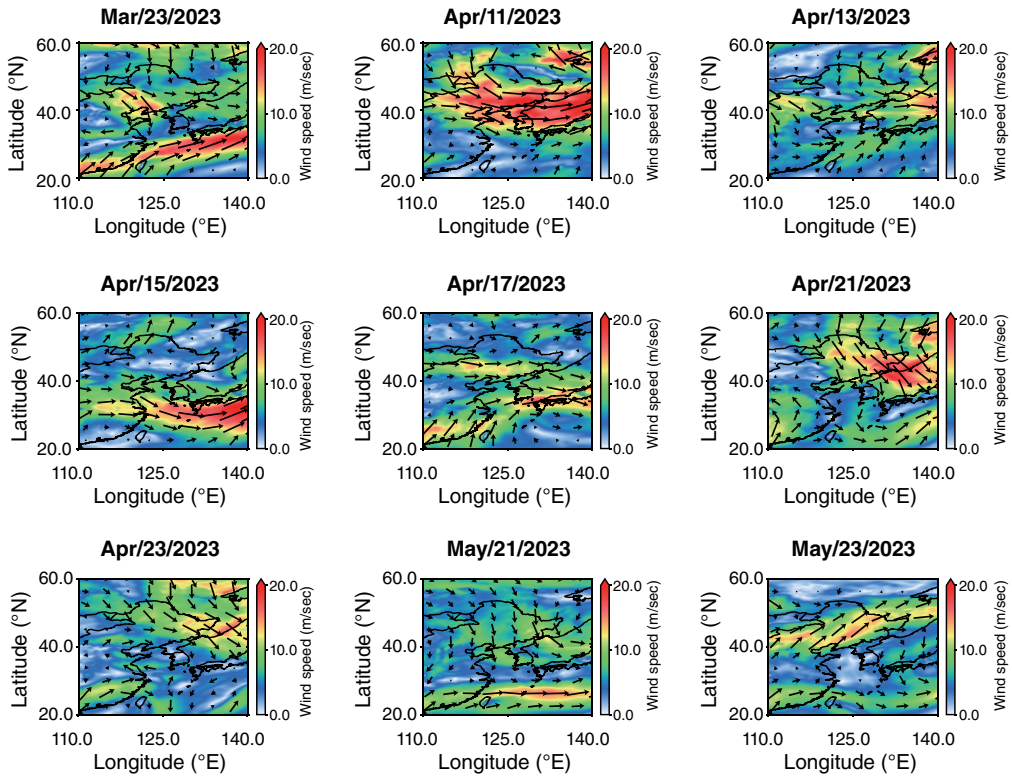


Fig. 4. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) Wind Field Analysis for Selected 9 High Pollution Event Days (wind speed at 800 hpa).

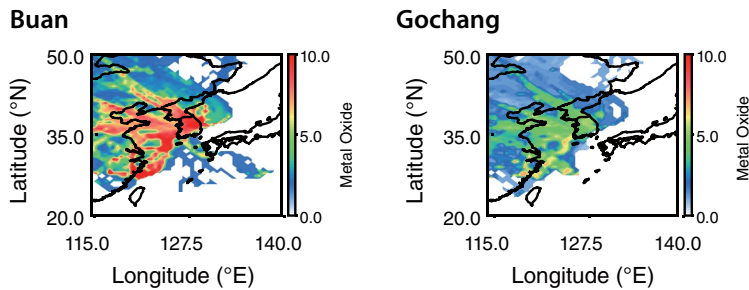


Fig. 5. Residence Time Weighted Concentration (RTWC) results in rice (Buan) and field (Gochang) areas of Jeollabuk-do during the event periods.

요약하면 동일 기간 다른 관측지점에서 입자상 물질의 증가가 나타났으며, 입자상 물질의 증가 성분은 두 지역에서 동일하였을 뿐만 아니라 ERA5 모델 및 RTWC 모델을 기준으로 두 관측지점은 서풍에 영향을 받고 있다.

3.2 농업지역 대기오염물질의 특성 및 장거리 외부 유입에 대한 영향

장거리 외부 유입 기간의 대기오염물질 특성을 살펴본 결과 PM_{2.5} 내 지각물질을 포함한 metal oxides의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 장거리 외부 유입 기간에 증가된 metal oxides 항목은 Ba, Ti, Ni, V, As, Ti,

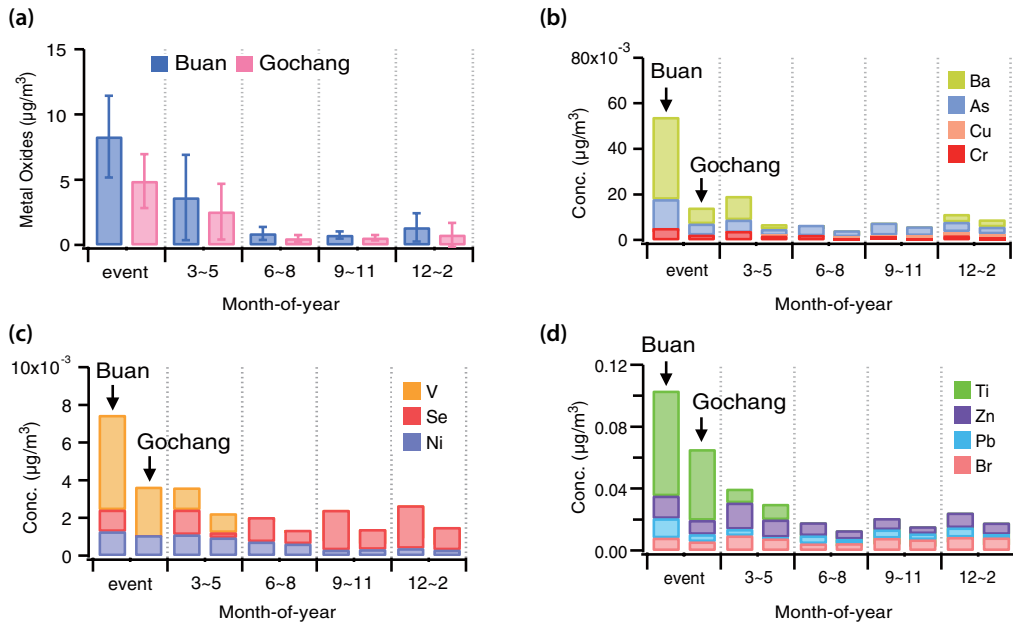


Fig. 6. Average concentrations of metal oxides and trace elements during events in Spring (March to May), Summer (June to August), Fall (September to November), and Winter (December to February) in rice Fields (Buan) and field Areas (Gochang) of Jeollabuk-do.

Cu, Zn 및 Pb로 나타났으며(그림 6), 이 중 Ba, Ti, Ni, V, As 및 Ti은 장거리 외부 유입 기간이 이외 기간과 비교하여 큰 폭으로 증가하였다. 반면 Cu, Zn 및 Pb는 소폭 증가한 것으로 나타났다. 증가된 metal oxides 성분은 모두 인체 내 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)을 증가시키는 물질로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 인체 위해성을 증가시키는 물질이다 (Charrier and Anastasio, 2012; Cho *et al.*, 2012; Tao *et al.*, 2003). 반면 가스상 물질인 NH_3 , NO, SO_2 및 O_3 의 증가는 확인되지 않아, 본 연구의 장거리 외부 유입에 의한 대기오염물질의 변화는 입자상 물질의 농도 및 $\text{PM}_{2.5}$ 성분 변화만이 있었다.

장거리 유입 기간에 증가된 metal oxide를 세부적으로 살펴보면 부안의 경우 Ba가 5.4배, Ti 7.6배, Ni 1.9배, V 4.1배, As 2.3배 증가하였으며, 고창은 Ba 2.9배, Ti 8.4배, Ni 1.9배, V 3.3배, As 1.4배 증가하였다. 여기서 Ba는 연소 외 배출물질로 브레이크 마모 등 교통 배출원으로 분류되며, 교통량 증가에 의해 대기

중 Ba가 증가된다(Harrison *et al.*, 2012; Gietl *et al.*, 2010). Ti는 화학 및 석유화학 산업에서 주로 내식성 등의 표면 코팅에 사용되나, 주요 배출원으로 도로변 먼지의 재비산으로 분류된다(Lin *et al.*, 2018; Fitzgerald *et al.*, 2015; Fan *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2006). 즉, Ba와 Ti는 교통량 배출원으로 분류되는 성분이다. Ni는 시멘트, 유리, 스테인리스 스틸 및 벽돌 등을 생산하는 산업시설에서 배출될 수 있으나 주요 배출원은 중유 연소로 확인되며, V 역시 중유 연소를 기반으로 하는 산업시설에서 배출된다(Lin *et al.*, 2018; Hasheminassab *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; de Foy *et al.*, 2012; Tian *et al.*, 2012). 따라서 Ni 및 V는 중유 연소를 기반으로 하는 산업시설에서 주로 배출되는 성분이다. As는 주로 석탄 연소의 배출물로 확인되며, 겨울철 석탄 연료에 의한 난방 또는 산업시설의 석탄 연소에서 발생되는 물질이다(Li *et al.*, 2015).

연구 지역은 서풍에 의한 장거리 외부 유입이 이루어짐을 ERA5 모델 및 RTWC 모델로 확인한 바 있다.

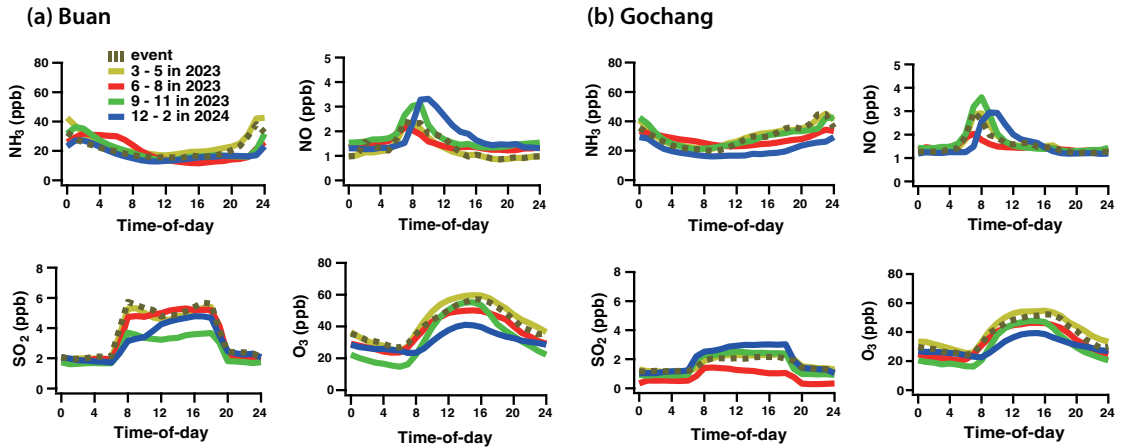


Fig. 7. Seasonal variations in time of day of NH_3 , NO , SO_2 , O_3 measurements in (a) rice (Buan) and (b) field (Gochang) areas of Jeollabuk-do.

장거리 유입 기간에 증가된 Ba, Ti, Ni, V, As 및 Ti와 ERA5 모델, RTWC 모델을 기준으로 판단할 경우 장거리 외부 유입은 중국 북부(베이징, 톈진, 타이위안, 정저우) 및 서북부(시안, 란저우)에서 유입된 것으로 본다. 중국 북부와 서북부는 교통량에 의한 Ni 및 Ba의 고농도 현상이 공통적으로 나타나는 지역이며, 중국 북부는 625개의 산업시설이 존재함과 동시에 주요 산업은 화학제조 시설로 나타나 중유 연소 기반의 산업이 활성화되어있다(Peng *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021). 또한 중국 서북부는 석탄 탄광이 존재하는 곳으로서 중국 연간 석탄 생산량의 4분의 1인 약 190억 톤의 석탄을 생산한다(Han, 2019). 따라서 중국 서북부의 난방 및 산업시설은 석탄 연소를 바탕으로 이루어진다. 이에 중국 북부 및 서북부의 $\text{PM}_{2.5}$ 는 본 연구에서 장거리 유입에 의해 증가된 Ba, Ti, Ni, V, As, Ti를 고농도로 함유하고 있다(Liu *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2013). 추가적으로 ERA5 모델 및 RTWC 모델 역시 주요 배출원을 중국 북부와 서북부 영향이 높은 것으로 나타난다. 이러한 결과를 종합할 경우 연구 지역에 대한 장거리 외부 유입은 중국 북부 및 서북부 지역의 영향인 것으로 분석된다.

농업지역 대기오염물질의 특성을 살펴보기 위해 event period 이외 기간을 대상으로 분석 성분의 특성

을 살펴보았다. Event period 이외 기간의 입자상 물질 농도는 부안 PM_{10} 35.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 19.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 고창 PM_{10} 27.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 14.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 1년 관측 평균과 큰 차이가 없었다. $\text{PM}_{2.5}$ 내 metal oxides 농도는 부안과 고창 모두에서 0.9~1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위로 나타났으며, 논 특성의 농업활동을 하는 부안이 밭 특성의 농업활동을 하는 고창보다 높았다. 계절별 metal oxides의 농도는 부안과 고창 모두 봄이 가장 높았으며, 다음으로 겨울이 높았다. 다만 여름과 겨울은 부안과 고창의 metal oxides의 농도에 차이를 보였다. 부안은 봄, 겨울, 여름, 가을 순으로 metal oxide가 높은 반면, 고창은 봄, 겨울, 가을, 여름 순으로 metal oxides 농도가 높았다. 가스상 물질의 농도는 부안 NH_3 20.62 ppb, NO 1.57 ppb, SO_2 3.17 ppb, O_3 36.30 ppb였으며, 고창 NH_3 28.37 ppb, NO 1.61 ppb, SO_2 1.61 ppb, O_3 33.61 ppb로 나타났다. 부안지역과 고창지역의 가스상 물질을 살펴볼 경우 NO 와 O_3 는 큰 차이를 나타내지 않았지만 NH_3 및 SO_2 는 각각 고창과 부안이 높았다. 이러한 결과는 농업지역 특성 및 농업 환경의 차이로 기인된 것으로 분석된다.

2020년 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 자료에 의하면 비료 사용 농경지에서 배출되는 NH_3 는 부안 325톤, 고창 268톤으로

부안이 고창과 비교하여 약 21% 높다. 반면 축사, 노천 및 농업잔재물 소각 등의 생물성 연소로부터 배출되는 NH₃는 고창이 높다. 또한 농경지 특성에 기인한 질소 비료의 NH₃ 배출계수는 논농사 지역에서 높고 밭농사 지역에서 낮으며, 비료의 NH₃ 배출계수는 쌀 재배에서 가장 높은 수치(0.14)를 나타낸다(Ma *et al.*, 2021). 즉, 축사 및 생물성 연소 활동을 제외할 경우 비료 사용에 대한 배출량과 농업 특성에 기인하여 NH₃는 고창과 비교하여 부안지역이 높아야 한다. 하지만 실제 NH₃ 농도는 부안이 20.62 ppb, 고창이 28.37 ppb로 고창지역이 높다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 고창지역 축사의 영향과 생물성 연소의 영향으로 해석된다. 농업활동에 사용되는 질소 비료와 퇴비의 NH₃ 배출계수 평균은 각각 0.13 및 0.14이나, 축사의 NH₃를 배출하는 소와 돼지의 분뇨 슬러리의 NH₃ 배출계수 평균은 각각 0.24 및 0.29로 축사의 NH₃ 배출계수가 높다(Ma *et al.*, 2021; van der Weerden *et al.*, 2021). 또한 통계연보에서 확인된 부안과 고창의 가축(한우, 젓소, 돼지, 닭, 말, 산양, 면양) 사육두수는 부안 4,956,783마리와 6,833,016마리로 고창이 부안과 비교하여 약 38% 이상 높다. 즉, 농업활동과 비교하여 NH₃의 배출계수가 높은 축사의 운영은 고창지역이 부안지역보다 높으며, 이러한 원인이 연구지역 NH₃ 농도에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 또한 일년 1모작을 하는 논농사 지역과 차별적으로 밭농사 지역인 고창은 계절에 따라 재배작물을 달리하여 파종 및 수확 활동을 할 수 있다. 이는 계절별 비료의 지속적인 사용과 함께 농업 부산물이 증가되는 결과로 이어진다. 즉, 고창지역은 계절에 따라 연소 활동이 가능한 농업 부산물을 발생시킨다는 특성이 있으며, 이에 생물성 연소의 소각 비율이 부안지역과 비교하여 높을 것으로 추정된다. SO₂의 경우 부안지역이 3.17 ppb, 고창지역이 1.61 ppb로 부안지역이 고창지역과 비교하여 약 2배 이상 높게 나타났다. 이는 수경재배를 하는 논과 노지재배를 하는 밭의 농업 환경 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 농업 활동에 사용되는 황산암모늄, 황산칼륨 및 퇴비는 토

양 분해 과정을 통해 SO₂ 가스를 생성하게 된다. 이때 온도와 습도가 높을 경우 SO₂ 가스의 발생량은 증가한다(Lu *et al.*, 2023; Yun *et al.*, 2018). 즉, 수경재배를 하는 부안의 논 특성은 노지재배와 비교하여 SO₂ 가스 발생량을 증가시키는 환경을 가지고 있다. 따라서 논과 밭이라는 농업 환경 차이가 반영되어 부안지역의 SO₂가 고창지역보다 높을 것으로 추정된다. 결론적으로 농업지역 대기오염물질 중 가스상 물질은 농업활동뿐만 아니라 농업지역에 위치한 축사의 영향, 생물성 연소의 영향뿐만 아니라 농업 환경 특성에 기인하여 영향을 받고 있다.

4. 결 론

본 연구는 농업지역 대기오염물질의 특성을 확인하기 위해 수행되었다. 연구를 위하여 농업지역인 부안과 고창을 대상으로 1년 동안 PM₁₀, PM_{2.5} 등의 대기오염물질을 관측 및 분석하였다. 또한 연구 기간에 관측된 고농도 현상을 이해하여 연구 지역의 장거리 외부 유입 현상을 지역 대기오염물질과 구분하였다. 연구 결과 입자상 물질의 증가 현상 및 PM_{2.5} 내 metal oxide 농도를 기준으로 장거리 외부 유입 시기를 특정할 수 있었다. 장거리 외부 유입으로부터 연구 지역 내 PM_{2.5}의 Ba, Ti, Ni, V, As, Ti, Cu, Zn 및 Pb가 증가하였다. 이들 물질은 PM_{2.5} 내 ROS를 증가시키는 물질로 장거리 외부 유입 시 PM_{2.5}의 인체 위해성이 증가될 수 있다. ERA5 및 RTWC를 기준으로 장거리 외부 유입은 연구 지역 서풍에 의한 영향을 받고 있었으며, 세부적으로 중국 북부 및 서북부의 영향이 있는 것으로 추정하였다. 농업지역 대기오염물질을 살펴본 결과 PM₁₀ 농도는 약 25~35 µg/m³ 수준이었으며, PM_{2.5}는 약 12~20 µg/m³ 범위를 나타내었다. 또한 농업지역 가스상 물질 중 NH₃는 농업활동뿐만 아니라 농업지역 축산 활동에 의한 영향을 받고 있으며, SO₂의 경우 밭농사 지역과 비교하여 논농사 지역에서 높다. 연구 결과로부터 농업지역 대기오염

물질의 특성 및 장거리 외부 유입에 대한 개략적인 특성을 도출할 수 있다. 향후 본 연구 결과를 통해 농업지역 및 장거리 외부 유입에 대한 관리가 이루어질 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국립농업과학원(RS-2022-RD010418) 지원으로 수행되었습니다. 전구가스성분 측정 및 성분 분석에 수고한 모든 연구원분들께 깊은 감사드립니다.

References

- Agrawal, M., Singh, B., Rajput, M., Marshall, F., Bell, J.N.B. (2003) Effect of air pollution on peri-urban agriculture: a case study, *Environmental Pollution*, 126(3), 323-329. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00245-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00245-8)
- Aneja, V.P., Schlesinger, W.H., Erisman, J.W. (2009) Effects of agriculture upon the air quality and climate: research, policy, and regulations, *Environmental Science and Technology*, 43, 4234-4240. <https://doi.org/10.1021/es8024403>
- Bae, M.S., Demerjian, K.L., Schwab, J.J. (2006) Seasonal estimation of organic mass to organic carbon in PM_{2.5} at rural and urban locations in New York state, *Atmospheric Environment*, 40(39), 7467-7479. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.008>
- Charrier, J.G., Anastasio, C. (2012) On dithiothreitol (DTT) as a measure of oxidative potential for ambient particles: evidence for the importance of soluble transition metals, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(5), 11317. <https://doi.org/10.5194/acp-12-9321-2012>
- Chen, W., Tong, D.Q., Zhang, S., Zhang, X., Zhao, H. (2017) Local PM₁₀ and PM_{2.5} emission inventories from agricultural tillage and harvest in northeastern China, *Journal of Environmental Sciences*, 57, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.02.024>
- Cho, W.S., Duffin, R., Poland, C.A., Duschl, A., Oostingh, G.J., MacNee, W., Bradley, M., Megson, I.L., Donaldson, K. (2012) Differential pro-inflammatory effects of metal oxide nanoparticles and their soluble ions in vitro and in vivo; zinc and copper nanoparticles, but not their ions, recruit eosinophils to the lungs, *Nanotoxicology*, 6(1), 22-35. <https://doi.org/10.3109/17435390.2011.552810>
- de Foy, B., Smyth, A.M., Thompson, S.L., Gross, D.S., Olson, M.R., Sager, N., Schauer, J.J. (2012) Sources of nickel, vanadium and black carbon in aerosols in Milwaukee, *Atmospheric Environment*, 59, 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.002>
- Fan, W., Duan, R.G., Yokoi, T., Wu, P., Kubota, Y., Tatsumi, T. (2008) Synthesis, crystallization mechanism, and catalytic properties of titanium-rich TS-1 free of extraframework titanium species, *Journal of the American Chemical Society*, 130(31), 10150-10164. <https://doi.org/10.1021/ja7100399>
- Fitzgerald, E., Ault, A.P., Zauscher, M.D., Mayol-Bracero, O.L., Prather, K.A. (2015) Comparison of the mixing state of long-range transported Asian and African mineral dust, *Atmospheric Environment*, 115, 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.031>
- Frank, S., Havlík, P., Stehfest, E., van Meijl, H., Witzke, P., Pérez-Domínguez, I., van Dijk, M., Doelman, J.C., Fellmann, T., Koopman, J.F., Tabeau, A., Valin, H. (2019) Agricultural non-CO₂ emission reduction potential in the context of the 1.5°C target, *Nature Climate Change*, 9(1), 66-72. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0358-8>
- Gietl, J.K., Lawrence, R., Thorpe, A.J., Harrison, R.M. (2010) Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road, *Atmospheric Environment*, 44(2), 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.016>
- Guo, L., Zhao, B., Jia, Y., He, F., Chen, W. (2022) Mitigation strategies of air pollutants for mechanical ventilated livestock and poultry housing—A review, *Atmosphere*, 13(3), 452. <https://doi.org/10.3390/atmos13030452>
- Han, Y. (2019) The status, dilemma and breakthrough of Shanxi Province energy transformation and development, *Coal Economic Research*, 39(9), 68-74.
- Harrison, R.M., Jones, A.M., Gietl, J., Yin, J., Green, D.C. (2012) Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements, *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6523-6529. <https://doi.org/10.1021/es300894r>
- Hasheminassab, S., Daher, N., Ostro, B.D., Sioutas, C. (2014) Long-term source apportionment of ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) in the Los Angeles Basin:

- A focus on emissions reduction from vehicular sources, *Environmental Pollution*, 193, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.012>
- Hellack, B., Quass, U., Beuck, H., Wick, G., Kuttler, W., Schins, R.P., Kuhlbusch, T.A. (2015) Elemental composition and radical formation potency of PM₁₀ at an urban background station in Germany in relation to origin of air masses, *Atmospheric Environment*, 105, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.033>
- Huang, X., Song, Y., Li, M., Li, J., Huo, Q., Cai, X., Zhu, T., Hu, M., Zhang, H. (2012) A high-resolution ammonia emission inventory in China, *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1), <https://doi.org/10.1029/2011GB004161>
- Lee, Y., Song, M., Kim, E., Oh, S.H., Park, C., Choi, W., Lee, T., Shon, Z.H., Bae, M.S. (2020), Source identification of PM_{2.5} major elemental components at the harbor industrial area in Busan: comparison of trace elemental concentrations using two XRFs, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 216-227. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.216>
- Li, F., Yan, J., Wei, Y., Zeng, J., Wang, X., Chen, X., Zhang, C., Li, W., Chen, M., Lu, G. (2021) PM_{2.5}-bound heavy metals from the major cities in China: Spatiotemporal distribution, fuzzy exposure assessment and health risk management, *Journal of Cleaner Production*, 286, 124967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124967>
- Li, L., Wen, Y., Peng, L., Bai, H., Liu, F., Liu, X. (2015) Study on the characteristics of As and heavy metals in PM_{2.5} and PM₁₀ in the Spring of Taiyuan City, *Journal of Taiyuan University of Technology*, 46, 104-109. <https://doi.org/10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2015.01.021>
- Li, X., Zhang, C., Liu, P., Liu, J., Zhang, Y., Liu, C., Mu, Y. (2020) Significant influence of the intensive agricultural activities on atmospheric PM_{2.5} during autumn harvest seasons in a rural area of the North China Plain, *Atmospheric Environment*, 241, 117844. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117844>
- Lin, H., Tao, J., Qian, Z., Ruan, Z., Xu, Y., Hang, J., Xu, X., Liu, T., Guo, Y., Zeng, W., Xiao, J., Guo, L., Li, X., Ma, W. (2018) Shipping pollution emission associated with increased cardiovascular mortality: A time series study in Guangzhou, China, *Environmental Pollution*, 241, 862-868. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.027>
- Lin, N.H., Tsay, S.C., Maring, H.B., Yen, M.C., Sheu, G.R., Wang, S.H., Chi, K.H., Chuang, M.T., Ou-Yang, C.F., Fu, J.S., Reid, J., Lee, C.T., Wang, L.C., Wang, L.J., Hsu, C.N., Sayer, A.M., Holben, B.N., Chu, Y.C., Nguyen, X.A., Sopajaree, K., Liu, G.R. (2013) An overview of regional experiments on biomass burning aerosols and related pollutants in Southeast Asia: From BASE-ASIA and the Dongsha Experiment to 7-SEAS, *Atmospheric Environment*, 78, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.066>
- Liu, P., Lei, Y., Ren, H., Gao, J., Xu, H., Shen, Z., Zhang, Q., Zheng, C., Liu, H., Zhang, R., Pan, H. (2017) Seasonal variation and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} during winter and summer over Xi'an, China. *Atmosphere*, 8(5), 91. <https://doi.org/10.3390/atmos8050091>
- Lu, D., Zhang, Y., Feng, W., Zeng, W., Zhou, Q. (2023) Experimental and theoretical comparative analysis of modified graphene (GO, Pd-G, Pd-GO) sensing performance toward SO₂ in agricultural greenhouse, *Ceramics International*, 49(16), 26516-26529. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.05.186>
- Ma, R., Zou, J., Han, Z., Yu, K., Wu, S., Li, Z., Liu, S., Niu, S., Horwath, W.R., Zhu-Barker, X. (2021) Global soil-derived ammonia emissions from agricultural nitrogen fertilizer application: A refinement based on regional and crop-specific emission factors, *Global Change Biology*, 27(4), 855-867. <https://doi.org/10.1111/gcb.15437>
- Marshall, F.M., Te-Lintelo, D.T.H. (2001) Pollution Effects: Social and economic impacts of urban and peri-urban agriculture in India, *Urban Agriculture Magazine* 5 Leusden.
- Menon, S., Hansen, J., Nazarenko, L., Luo, Y. (2002) Climate Effects of Black Carbon Aerosols in China and India. *Science*, 297(5590), 2250-2253. <https://doi.org/10.1126/science.1075159>
- Oh, S.H., Park, K., Park, M., Song, M., Jang, K.S., Schauer, J.J., Bae, G.N., Bae, M.S. (2023) Comparison of the sources and oxidative potential of PM_{2.5} during winter time in large cities in China and South Korea, *Science of The Total Environment*, 859, 160369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160369>
- Park, C., Song, M., Park, G., Kim, K., Lee, T., Lee, S., Lee, J., Bae, M.S. (2021) Real-World Vehicle Emission Rate of Particle Size Distributions Based on Measurement of Tunnel Flow Coefficient, *Applied Sciences*, 11(2), 794. <https://doi.org/10.3390/app11020794>
- Pattey, E., Qiu, G. (2012) Trends in primary particulate matter emissions from Canadian agriculture, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(7), 737-747. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.672058>

- Peng, J.Y., Zhang, S., Han, Y., Bate, B., Ke, H., Chen, Y. (2022) Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment, *Science of The Total Environment*, 816, 151632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151632>
- Ryall, D.B., Derwent, R.G., Manning, A.J., Redington, A.L., Cornden, J., Millington, W., Simmonds, P.G., O'Doherty, S., Carslaw, N., Fuller, G.W. (2002) The origin of high particulate concentrations over the United Kingdom, March 2000, *Atmospheric Environment*, 36(8), 1363-1378. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00522-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00522-2)
- Salthammer, T., Gunschera, J. (2021) Release of formaldehyde and other organic compounds from nitrogen fertilizers, *Chemosphere*, 263, 127913. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127913>
- Seibert, P., Kromp-Kolb, H., Baltensperger, U., Jost, D., Schwikowski, M., Kasper, A., Puxbaum, H. (1994) Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites, *Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere*, 15(9), 689-693
- Sicard, P., Paoletti, E., Agathokleous, E., Araminiè, V., Proietti, C., Coulibaly, F., De Marco, A. (2020) Ozone weekend effect in cities: Deep insights for urban air pollution control, *Environmental Research*, 191, 110193. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110193>
- Sin, J.H., Sin, M.J. (2021) Rural area spatial classification plan for non-urban area management, *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 63, 21-26,
- Song, M., Park, C., Choi, W., Park, M., Lee, K., Park, K., Park, S., Bae, M.S. (2020a) Organic Molecular Marker from Regional Biomass Burning-Direct Application to Source Apportionment Model, *Applied Sciences*, 10(13), 4449. <https://doi.org/10.3390/app10134449>
- Song, M., Kim, M., Kim, M., Lee, K.H., Bae, M.S. (2020b) Relationship between Long-range Transport of Ammonia and Ammonium in Wintertime in Suburban Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 543-557. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.543>
- Song, M., Park, J., Lim, Y., Oh, S.H., Lee, J.Y., Lee, K.H., Ro, C.U., Bae, M.S. (2022) Long-range transport impacts from biomass burning and secondary pollutant sources based on receptor models during KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 276, 119060. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119060>
- Song, M., Kim, E., Lee, Y., Oh, S.H., Yu, G.H., Choe, S., Park, G., Lee, T., Bae, M.S. (2023) Seasonal vehicle emission rate of chemical compounds related to fuel type from on-road tunnel measurement, *Atmospheric Environment*, 305, 119777. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119777>
- Song, M., Kim, M., Oh, S.H., Yu, G.H., Choe, S., Jeon, H., Ko, D.H., Park, C., Bae, M.S. (2024) Characteristics of Atmospheric Pollutants in Paddy and Dry Field Regions: Analyzing the Oxidative Potential of Biomass Burning, *Atmosphere*, 15(4), 493. <https://doi.org/10.3390/atmos15040493>
- Song, Y., Zhang, Y., Xie, S., Zeng, L., Zheng, M., Salmon, L.G., Shao, M., Slanina, S. (2006) Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by positive matrix factorization, *Atmospheric Environment*, 40(8), 1526-1537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.039>
- Tao, F., Gonzalez-Flecha, B., Kobzik, L. (2003) Reactive oxygen species in pulmonary inflammation by ambient particulates, *Free Radical Biology and Medicine*, 35(4), 327-340. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(03\)00280-6](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(03)00280-6)
- Ti, C., Han, X., Chang, S.X., Peng, L., Xia, L., Yan, X. (2022) Mitigation of agricultural NH₃ emissions reduces PM_{2.5} pollution in China: A finer scale analysis, *Journal of Cleaner Production*, 350, 131507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131507>
- Tian, H.Z., Lu, L., Cheng, K., Hao, J.M., Zhao, D., Wang, Y., Jia, W.X., Qiu, P.P. (2012) Anthropogenic atmospheric nickel emissions and its distribution characteristics in China, *Science of The Total Environment*, 417-418, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.069>
- Uygur, N., Karaca, F., Alagha, O. (2010) Prediction of sources of metal pollution in rainwater in Istanbul, Turkey using factor analysis and long-range transport models, *Atmospheric Research*, 95(1), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.08.007>
- Valenzuela, A., Olmo, F., Lyamani, H., Anton, M., Quirantes, A., Alados-Arboledas, L. (2012) Classification of aerosol radiative properties during African desert dust intrusions over southeastern Spain by sector origins and cluster analysis, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D6), <https://doi.org/10.1029/2011JD016885>
- van der Weerden, T.J., Noble, A., De Klein, C.A.M., Hutchings, N., Thorman, R.E., Alfaro, M.A., Amon, B., Beltran, I., Grace, P., Hassouna, M., Krol, D.J., Leytem, A.B., Salazar, F., Velthof, G.L. (2021) Ammonia and nitrous oxide emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure, *Journal of Environmental Quality*, 50(5), 1005-1023. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20259>
- Wang, R., Bei, N., Pan, Y., Wu, J., Liu, S., Li, X., Yu, J., Jiang, Q., Tie,

- X., Li, G. (2023) Urgency of controlling agricultural nitrogen sources to alleviate summertime air pollution in the North China Plain, *Chemosphere*, 311, 137124. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137124>
- World Health Organization (WHO) (2006) WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005: Summary of risk assessment. Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air: particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre: mise à jour mondiale 2005: synthèse de l'évaluation des risques, WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, WHO IRIS. <https://iris.who.int/handle/10665/69477>
- Wyer, K.E., Kelleghan, D.B., Blanes-Vidal, V., Schaubberger, G., Curran, T.P. (2022) Ammonia emissions from agriculture and their contribution to fine particulate matter: A review of implications for human health. *Journal of Environmental Management*, 323, 116285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116285>
- Xu, P., Chen, A., Houlton, B.Z., Zeng, Z., Wei, S., Zhao, C., Lu, H., Liao, Y., Zheng, Z., Luan, S., Zheng, Y. (2020) Spatial Variation of Reactive Nitrogen Emissions From China's Croplands Codetermined by Regional Urbanization and Its Feedback to Global Climate Change, *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2019GL086551. <https://doi.org/10.1029/2019GL086551>
- Yu, G.H., Song, M., Oh, S.H., Choe, S., Jeon, H., Ko, D.H., Bae, M.S. (2024a) Wintertime Diurnal Variation in Absorption Coefficient of Brown Carbon Associated with the Molecular Marker of Levoglucosan, *Applied Sciences*, 14(10), 4117. <https://doi.org/10.3390/app14104117>
- Yu, G.H., Shin, H.J., Jung, H.J., Song, M., Oh, S.H., Choe, S., Kang, G.U., Jeon, H., Bae, M.S. (2024b) Insights into national distribution of NH₃ concentrations in Republic of Korea: findings from passive sampler observations and implications for sources and management, *Environmental Monitoring and Assessment* 196, 121. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12288-1>
- Yun, J., Zhu, C., Wang, Q., Hu, Q., Yang, G. (2018) Strong affinity of mineral dusts for sulfur dioxide and catalytic mechanisms towards acid rain formation, *Catalysis Communications*, 114, 79-83. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2018.06.011>
- Zhang, F., Chen, Y., Tian, C., Wang, X., Huang, G., Fang, Y., Zong, Z. (2014) Identification and quantification of shipping emissions in Bohai Rim, China, *Science of The Total Environment*, 497-498, 570-577. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.016>
- Zhang, L., Chen, Y., Zhao, Y., Henze, D.K., Zhu, L., Song, Y., Paulot, F., Liu, X., Pan, Y., Lin, Y., Huang, B. (2018) Agricultural ammonia emissions in China: Reconciling bottom-up and top-down estimates, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(1), 339-355. <https://doi.org/10.5194/acp-18-339-2018>
- Zhao, P., Dong, F., He, D., Zhao, X., Zhang, X., Zhang, W., Yao, Q., Liu, H. (2013) Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(9), 4631-4644. <https://doi.org/10.5194/acp-13-4631-2013>
- Zhou, L., Chen, X., Tian, X. (2018) The impact of fine particulate matter (PM_{2.5}) on China's agricultural production from 2001 to 2010, *Journal of Cleaner Production*, 178, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.204>
- Zhou, S., Yuan, Q., Li, W., Lu, Y., Zhang, Y., Wang, W. (2014) Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: Spatial variations, sources, and health implications, *Journal of Environmental Sciences*, 26(1), 205-213. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60399-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60399-X)

Authors Information

전하정 (국립목포대학교, 학석사연계과정)

(S214210@365.mokpo.ac.kr)

송명기 (국립목포대학교, 연구교수)

(msong@mnu.ac.kr)

오세호 (국립목포대학교, 박사과정)

(osh9119mnudk@mokpo.ac.kr)

고동훈 (국립목포대학교, 학사과정)

(ehdgn8011@mokpo.ac.kr)

유근혜 (국립목포대학교, 연구교수)

(fanygh89@mnu.ac.kr)

최서영 (국립목포대학교, 박사과정)

(S184221@365.mokpo.ac.kr)

박채형 (국립목포대학교, 박사과정)

(pch123421@mokpo.ac.kr)

김민욱 (국립농업과학원 연구사)

(minuk09@korea.kr)

배민석 (국립목포대학교, 교수)

(minsbae@mnu.ac.kr)