

실시간 모니터링 자료를 활용한 농업지역 대기오염물질 특성 분석

이혜민^{1,2}, 김혜원¹, 김진호¹, 김민욱^{1*}

Analysis of Air Pollutant Characteristics in Agricultural Areas Using Continuous Monitoring Data

Hye-Min Lee ^{1,2}, Hye-Won Kim ¹, Jin-Ho Kim ¹ and Min-Wook Kim ^{1*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과, ²충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목학과

¹Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Department of Agricultural and Rural Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

* Correspondence: minuk09@korea.kr

Abstract: This study examines air pollutant emissions from agricultural activities in paddy fields and cropland areas in Buan and Gochang, South Korea. From June 2022 to May 2024, air quality monitoring stations collected data on particulate matter (PM-10, PM-2.5) and gaseous pollutants (NO₂, SO₂, O₃). The findings indicate that particulate matter levels were notably higher in spring and fall, due to farming activities like herbicide application and crop harvesting. In contrast, gaseous pollutant levels remained within national air quality standards, although SO₂ displayed unique seasonal patterns, particularly in the paddy field areas, where concentrations were higher in the mornings and afternoons. A comparison between urban and agricultural areas showed similar patterns for particulate matter, influenced by external factors like dust storms, but agricultural areas exhibited higher concentrations during farming seasons. The study emphasizes the importance of establishing dedicated air quality monitoring systems in agricultural regions, as the emission characteristics differ significantly from urban areas. Future research is needed to investigate the chemical composition of finding particulate matter in these regions to develop more effective pollution control strategies and improve overall air quality management in agricultural areas.

Keywords: Agricultural air pollution, Air quality monitoring, Gaseous pollutants, Particulate matter (PM-10, PM-2.5), Seasonal variation

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.19>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 200-210

Received: September 3, 2024

Revised: September 19, 2024

Accepted: October 25, 2024

Published: November 11, 2024

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for
updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

현재 다양한 농업 활동으로 인한 환경오염 문제가 야기되고 있다. 대표적으로 농약사용, 화학비료 투입, 영농 부산물 소각 그리고 경지정리와 수확에서 발생하는 비산먼지 등이 많은 오염물질이 발생하고 있다[1-3]. 미세먼지(PM-10)와 초미세먼지(PM-2.5)는 대기 중 부유하며, 인체에 호흡기나 심혈관계 질환을 유발하여 삶의 질을 저하시키는 요인이다[4-6]. 환경부 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Sup-

port System, CAPSS)에 따르면 2021년 기준, 국내 초미세먼지(PM-2.5) 배출량은 비도로이동오염원(24%), 비산먼지(23%) 그리고 생물성연소(21%) 순으로 배출된다고 알려져 있다[7]. 미세먼지는 호흡기 및 심혈관 질환을 일으키며[5,8], 시정거리 감소 및 지구 열수지, 생태계교란 등 환경에 악영향을 미치기 때문에 관리가 필요하다[9,10]. 대기오염물질 중, SO_x 와 NO_x 는 대기 중에서 광화학 반응을 거쳐 2차 오염물질로 생성이 된다고 알려져 있다[11]. 2차 미세먼지 생성은 화학적으로 반응성이 높은 가스상 물질(NO_x , SO_x , O_3)과 밀접하게 연관되어 있다[12,13]. 도심지역이나 상업지역은 미세먼지와 대기오염물질에 대한 선행연구가 다수 진행되었지만, 농업 분야에서 배출되는 대기오염물질에 대한 인식과 연구는 미비한 실정이다. 농업 활동에 의해 배출되는 입자상 물질과 가스상 물질을 관리하기 위해서는 농업 활동에서 배출되는 대기오염물질의 현황을 파악해야 한다. 선행연구에 따르면 농업 활동에서 배출되는 입자상 및 가스상 물질은 작물 수확과정, 기계적 요인, 퇴비 및 농약 사용에 따른 화학용품 사용 등으로 발생된다고 알려져 있다[14]. 수질 조건, 토양 특성 및 환경, 작물 재배 시스템에 따라 대기오염물질의 배출 특성이 다르기 때문에 농업지역만의 배출 농도와 특성을 확인하는 것이 필요하다. 대기환경보전법에 따라 국가 및 지자체에서 대기환경 측정망을 운영하고 있다. 대기질 측정망은 오염물질을 효율적으로 관리할 수 있는 지표 역할을 해주며, 오염원의 규제 방법을 개발하거나 저감대책을 수립할 수 있는 목적으로 운영이 되고 있다[15,16]. 2022년 기준 환경부 및 지방자치단체에서 설치 목적에 따른 11개 종류, 506개소 측정소를 운영하고 있다. 측정망의 종류는 일반대기 측정망 3개(도시대기, 교외대기, 국가배경농도), 배출원 감시 측정망 4개(도로변대기, 항만, 유해대기물질, 대기중금속) 특수대기측정망 3개(산성강하물, 광화학대기오염물질, 지구대기) 장거리 성분 측정망 2개(PM-2.5, 집중측정망)로 목적을 달리하여 운영하고 있다[17]. 지자체나 환경부에서 측정망을 넓히고 있으나, 농업지역만의 대기질 측정망은 미비한 실정이다. 농업 활동에서 발생하는 입자상 물질과 가스상 물질의 배출량 측정 및 농업지역의 정확한 대기질 파악을 통하여, 농업지역만의 오염 특성 분석이 필요한 시점이다.

본 연구는 논, 밭 지역을 대표할 수 있는 두 곳에 대기질집중측정소를 구축하여 농업지역의 실시간으로 대기질 모니터링 측정을 진행하였다. 각 측정항목들의 계절별 경향과 농도 변화를 파악하고자 하였다. 이를 통해 농업지역만의 대기오염의 계절별 배출 특성과 농업지역 측정망 구축의 필요성에 대한 근거자료를 확보하고자 한다.

재료 및 방법

측정 지점 선정

선행연구에 따르면, 전라북도(이하 '전북') 지역은 국내의 최대 쌀 생산지 중 한 곳으로 농업 부분의 오염물질 배출이 높다[18]. 농업지역은 대표적으로 논 지역과 밭 지역으로 분류할 수 있으며, 농업지역만의 특성을 보는 대기질 모니터링을 위해 농지가 밀집되어 있는 농경지 중심으로 대상지역을 선정하였다. 환경부 대기오염 측정망 설치·운영지침에 따라서 주변의 산업단지와 축사, 차량 배출원을 최소화하는 곳으로 선정하였다. 논 지역을 대표하는 측정지점은 전북 부안군 계화면 간재로 692(식량원 계화도 시험지, 35°46'23"N 126°40'11"E), 밭 지역을 대표하는 측정지점은 전북 고창군 대산면 칠거리로 70(고창 대표기상관측소, 35°20'52"N 126°35'55"E)로 선정하였다. 전북 부안군(논 지역)의 경우 북동부는 평야지대, 남서부는 산지로 이루어져 있다. 그 중, 동북부의 평야 지대에서 논/밭 면적의 비율은 76%와 24%로 논이 비중이 매우 높은 지역이다[3]. 측정지점에 논이 넓고 균일하게 분포되어 있으며, 재배작물이 혼재되어 있지 않은 곳으로 선정하였다. 또한 인근의 축산시설이나 도로 및 공장 등 주변에 영향을 주지 않는 곳으로 선정하였다. 전북 고창군 지역(밭 지역)은 해양성 고기압에 영향을 받는 지역으로, 여름에는 더운 기온과 겨울에는 고기압의 영향을 받아 사계절이 뚜렷한 지역으로 알려져 있다. 계절적 특성을 토대로 고창지역의 경우 51% 가량 밭 농경지이며, 특용작물의 재배가 발달되어 있다. 고창지역도 마찬가지로 주변 환경에 영향을 받지 않는 밭 작물만 재배하는 곳으로 선정하였다. 측정 기간은 2022년 6월 1일부터 2024년 5월 31일까지 2년간 진행하였고, 환경부에서 운영하고 있는 대기오염집중 측정소에 준하는 측정소를 구축하여 측정을 진행하였다. 부안 사이트의 경우 인근의 벼 농사를 하는 것으로 조사되었으며, 고창 사이트의 경우 인근 수박 농사를 많이 하는 것으로 조사되었다[19].

농업 대기질 집중측정소 운영 방법

본 연구는 입자상 물질은 베타레이 방식인 PM-10, PM-2.5 (Spirant BAM 1020, Met One Instruments Inc., USA)를 사용하고, 가스상 물질은 NO_x (Serinus® 40, Ecotech ACOEM Group, Australia), SO_2 (Serinus® 50, Ecotech ACOEM Group, Australia),

O₃ (Serinus® 10, Ecotech ACOEM Group, Australia)를 사용하여 실시간 모니터링 장비를 구성하였다. 현행 도시 대기질 측정망의 측정물질은 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM-10, PM-2.5로 6가지 물질이 측정되고 있다. 질소산화물(NO_x)의 광화학 과정에서 오존과 미세먼지 발생을 유도하는 NO를 포함시켜[12,13] 농업지역의 대기오염 특성에 대해 분석하고자 한다. 설치된 장비는 ‘환경측정기기 형식승인·정도 검사에 관한 고시’에 의거하여 미세먼지 측정기(PM-10, PM-2.5), 가스상 물질측정기(NO_x, SO₂, O₃)에 대한 등가성 및 정도 검사를 진행 후, 설치하였다. 매월 사이트를 방문하여 시료 Filter 교체, Zero 교정, 시료 압력 및 온도 점검, Lamp 감도 점검을 실시하였다. 물질 측정 장비 외 온/습도 센서, 풍향·풍속계를 설치하여 측정소를 효율적으로 운영할 수 있도록 하였다.

도시대기질 측정망 자료수집 및 대기질 비교

선행연구에서는 도심이나 수도권 지역을 위주로 대기질 분석과 미세먼지와 오존의 메커니즘을 규명하는 연구가 진행되어 왔다. 농업지역의 대기질 측정자료 확보와 더불어서 도심지역과 비교를 통해서, 농업지역만이 갖는 대기질 특성 파악과 분석이 필요하다. 본 연구에서는 도심지역 및 측정 사이트 인근 대기오염물질 자료는 에어코리아 도시대기측정망 자료(<https://www.air-korea.or.kr>)를 활용하였다. 농업지역과 도심지역의 대기질 패턴 변화 및 추이를 파악하기 위해서, 전라북도지역에서 인구수가 가장 많은 전주지역의 도시대기질 측정망(전주시 완산구)를 선정하였다. 전주 도시대기질 측정망과 부안 사이트까지 약 45 km, 고창 사이트와는 약 110 km 떨어져 있다. 본 연구의 측정기간과 같은 기간으로 2022년 6월부터 2024년 5월까지 데이터만 비교하였으며, 에어코리아의 확정 자료만 사용하였다.

연구 결과

논, 밭 지역의 대기오염물질 월별 변화

논 지역

연구기간(2022.06.01.~2024.05.31.) 동안 관측된 논 지역(부안) 측정망의 실시간 농도 변화를 Fig. 1에 나타냈었다. 실시간 모니터링 자료는 이상치를 제거해 1시간 단위 데이터를 일별 농도로 산정하여 그래프로 반영하였다. Table 1은 논 지역(부안)의 측정한 기상자료(온도, 습도, 풍속)의 연간 평균값을 나타내었다. 논 지역의 입자상 물질의 농도 측정 결과, 2022~2023년도 관측한 PM-10은 평균 38.31 µg/m³, 2023~2024년도 관측한 평균은 32.85 µg/m³로 나타났고, 2023년 4월의 경우, PM-10은 최고농도인 289.37 µg/m³, PM-2.5는 125.03 µg/m³로 둘 다 높은 농도를 보이는 경향을 나타냈다. PM-10 고농도 발생 날 황사가 관측되었다. 특히 봄철의 경우 황사에 의한 외부 요인을 많이 받기 때문에, 다른 계절에 비해 증가하는 경향을 보였으며, 2023~2024년 봄철도 역시 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Annual average of Buan meteorological data

Buan (Paddy)		2022-2023 (Year)	2023-2024 (Year)
Temperature (°C)	Average	13.97	14.7
	Range	-9.3~31.46	-1.1~31.15
	N	362	344
Humidity (%)	Average	78.60	60.35
	Range	49.39~99.77	35.9~99.8
	N	362	344
Wind speed (m/s)	Average	2.80	2.60
	Range	0.0~16.2	1.2~12.8
	N	362	344

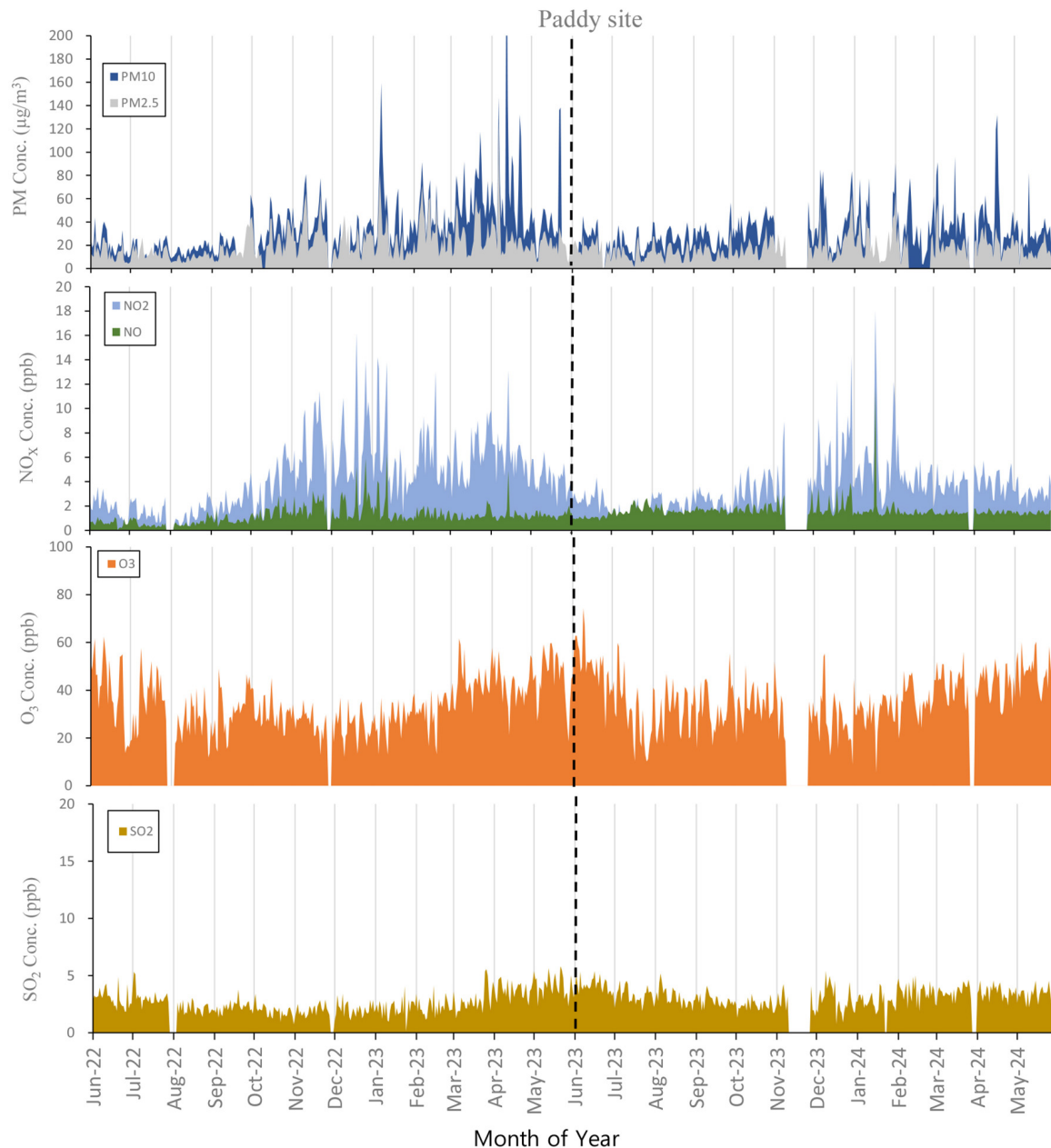


Fig. 1. Annual changes in air pollutant in Paddy site (Buan).

가스상 물질의 경우 NO_2 의 평균값은 2022~2023년도 관측한 평균은 4.39 ppb, 2023~2024년도 관측한 평균은 3.54 ppb로, NO_2 연간 대기환경기준 30 ppb보다 매우 낮은 경향을 보이고 있다. NO 의 2022~2023년도 평균값은 1.23 ppb, 2023~2024년도 평균값은 1.69 ppb로 NO_2 경향과 비슷하게 나타났다. NO_2 와 NO 농도는 2024년도 1월에 높은 농도를 보였는데 NO_2 의 최대 농도는 17.95 ppb, NO 는 11.65 ppb로 나타났다. 일별 농도 그래프의 NO_x 경향을 살펴보면, 2023년도 1월과 2024년도 1월에 NO 와 NO_2 가 높게 나타났고, 여름철의 경우 낮게 나오는 모습을 확인할 수 있었다. O_3 의 경우, 2023~2024년도 평균 농도는 33.96 ppb, 2023~2024년도 평균 농도는 36.54 ppb로 작년과 비슷한 농도가 나타났다. O_3 의 경우 일 평균 그래프를 살펴보면 여름철에 높게 나타났지만, 겨울철에도 크게 감소하는 경향을 보이지 않았다. 이는 겨울철의 차량 이동이나, 난방에 따라 NO_x 의 증가로 O_3 같이 증가하는 모습을 확인할 수 있었다[6,8]. SO_2 의 평균 농도는 2022~2023년도 2.61 ppb, 2023~2024년도는 5.39 ppb로 대체적으로 낮게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 또한 실시간 일 평균 그래프의 SO_2 는 전체적으로 낮게 나타난 모습을 보였다(Table 1, Fig. 1).

밭 지역

밭 지역은 고창에서 측정하였고, 연구기간(2022.06.01.~2024.05.31.) 동안 실시간으로 측정된 일별 그래프를 Fig. 2에 나타냈다. Table 2는 밭 지역(고창)에서 측정한 기상자료의 연평균을 나타내었다. 입자상 물질의 경우 PM-10의 2022~2023년도 평균 농도는 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023~2024년도 평균 농도는 $26.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2022~2023년도 평균 농도가 13% 증가하였다. PM-2.5의 경우, 2022~2023년도 평균 농도는 $21.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023~2024년도 평균 농도는 $18.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 작년 대비 19% 감소하였다. PM-10의 최고농도는 2023년도 봄철 $217.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, PM-2.5의 최고농도는 2023년 봄철 $93.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 입자상 물질의 월별 농도 변화 패턴은 봄철에 미세먼지가 급격하게 증가하는 모습을 확인할 수 있었고, 여름철에 감소하는 경향을 보이다 다시 겨울과 봄철에 증가하는 패턴을 확인하였다.

가스상 물질의 경우, NO_2 의 2022~2023년도 평균 농도는 3.65 ppb, 2023~2024년도 평균 농도는 3.61 ppb로 비슷한 농도를 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다. NO 의 경우, 2022~2023년도 평균값은 1.46 ppb, 2023~2024년도 평균값은 1.58 ppb로

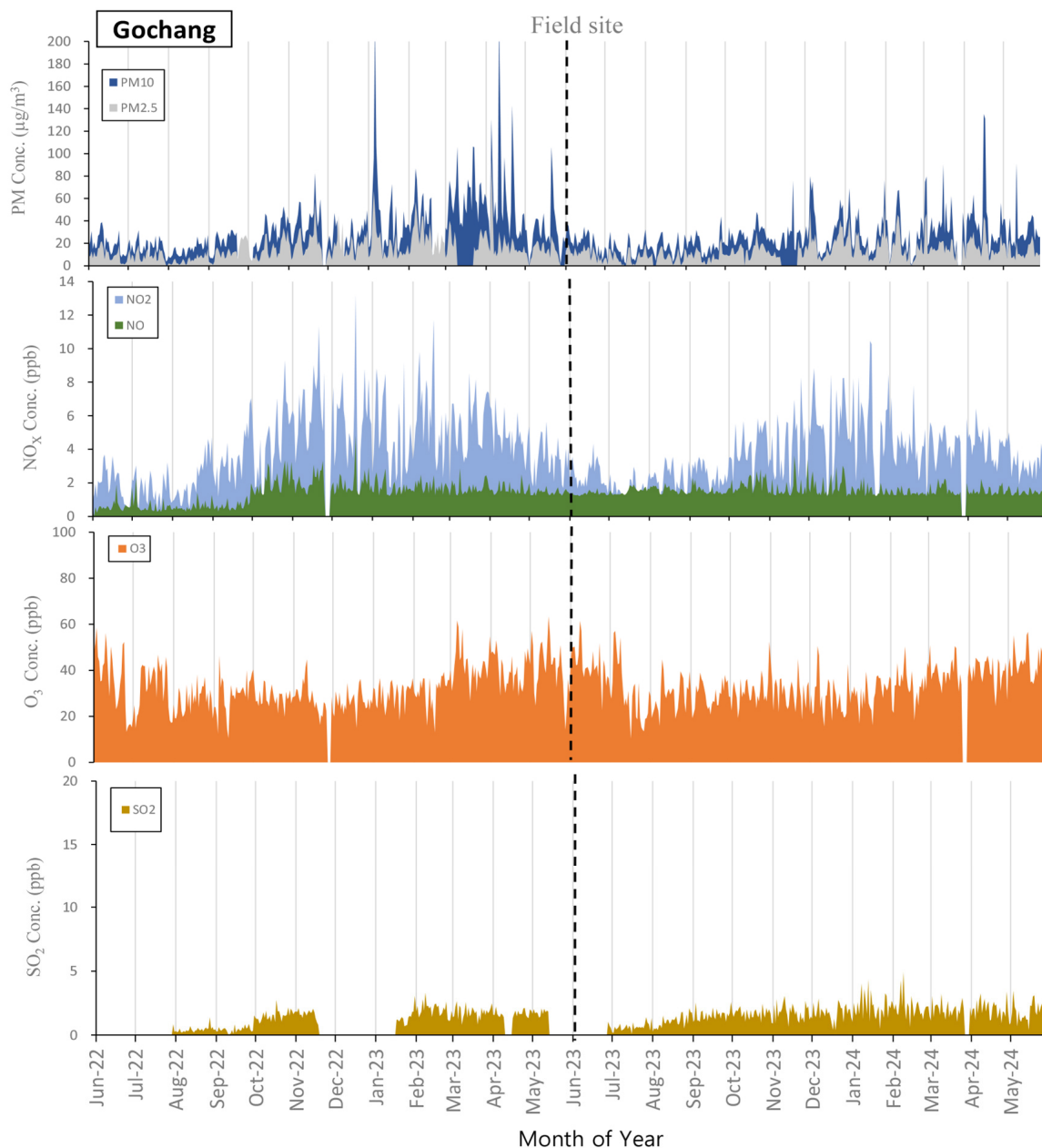


Fig. 2. Annual changes in air pollutants in field Site (Gochang).

Table 2. Annual average of Gochang meteorological data

Gochang (Field)		2022-2023 (Year)	2023-2024 (Year)
Temperature (°C)	Aver.	14.38	13.72
	Range	-7.9~29.55	-11~29.8
	N	334	360
Humidity (%)	Aver.	76.55	72.22
	Range	0~97.5	0.1~
	N	334	360
Wind speed (m/s)	Aver.	1.59	1.52
	Range	0.4~4.6	0.4~5.5
	N	334	360

나타났다. NO_x의 최고농도는 2024년 1월에 발생하였고, NO는 11.65 ppb, NO₂는 17.95 ppb로 나타났다. NO₂의 월별 농도 변화 그래프는 여름철에 감소하였다가, 겨울철에 상승하는 모습을 확인할 수 있었다. O₃의 경우, 2023~2024년도 평균 농도는 32.38 ppb로 나타났고, 2023~2024년도 평균 농도는 33.63 ppb로 작년과 비슷한 농도가 나타났다. O₃는 일 평균 그래프의 추이가 여름철에 증가하고, 겨울철에 살짝 감소하지만, 2년간 변화추이가 적은 비슷한 동향을 확인할 수 있었다. SO₂의 경우, 2022~2023년도 평균 농도는 1.33 ppb, 2023~2024년도 평균 농도는 1.67 ppb로 낮게 나타난 경향을 확인할 수 있었고, 일별 변화 추이를 살펴보면, 변동이 거의 없었다. 우리나라 입자상 물질의 대기환경 기준은 1일(24시간) 기준 PM-10 100 µg/m³, PM-2.5 35 µg/m³이다. 논 지역의 경우 측정기간 동안 1일(24시간) 환경기준 초과횟수는 PM-10의 12회, PM-2.5는 69회로 나타났다. 밭 지역의 PM-10 초과횟수는 12회, PM-2.5의 경우 27회로 나타났다. PM-10보다 PM-2.5의 환경기준 초과 횟수가 더 높은 것을 확인할 수 있었고, 밭 지역보다 논 지역에서 초과횟수가 많이 발생하였다. 가스상 물질의 대기환경기준은 24시간 기준 NO₂ 60 ppb, SO₂ 50 ppb, O₃는 8시간 기준 60 ppb이다. 가스상 물질의 경우 논, 밭 지역 모두 초과하는 일수가 없었다. 이를 통하여 논, 밭 지역의 가스상 물질은 환경기준을 넘지 않은 저농도에서 배출되는 동향을 확인할 수 있었다(Table 2, Fig. 2).

논, 밭 지역의 대기오염물질 연간 변화

Fig. 3은 고창, 부안 지역의 입자 및 가스상 물질의 연간 농도의 평균값을 나타내었다. Fig. 3에서 '22는 2022년 6월부터 2023년 5월, '23은 2023년 6월부터 2024년 5월의 평균값을 나타내었다. PM-10 논(부안) 지역은 38.21 µg/m³에서 32.85 µg/m³로 감소하는 경향을 보였고, 밭(고창) 지역의 경우 34.59 µg/m³에서 26.45 µg/m³로 증가하였다. PM-2.5 논 지역은 21.76 µg/m³에서 18.15 µg/m³로 감소하였고, 밭 지역은 16.56 µg/m³에서 15.67 µg/m³로 비슷한 농도를 보였다. 입자상 물질의 연간 환경기준은 PM-10은 50 µg/m³, PM-2.5는 15 µg/m³이다. PM-10의 경우 논, 밭 지역 모두 연간 평균치가 연간 환경기준을 넘지 않았다. 하지만 PM-2.5의 경우, 연간 평균치가 2년 동안 논, 밭 지역 모두 환경기준을 초과하였다. NO는 논 지역에서 작년 대비 1.23 ppb에서 1.61 ppb로 약간 증가하였으며, 밭 지역은 1.38 ppb에서 1.57 ppb로 약간 증가한 경향을 보였다. NO₂는 논 지역은 작년 대비 4.39 ppb에서 3.54 ppb로 감소하였으며 밭 지역은 4.07 ppb에서 3.60 ppb로 마찬가지로 감소하였다. SO₂는 논 지역은 작년 대비 2.61 ppb에서 3.20 ppb로 증가하였고, 밭 지역의 경우 1.34 ppb에서 1.67 ppb로 약간 증가하였다. O₃는 논 지역은 작년 대비 33.96 ppb에서 36.47 ppb로 증가하였고, 밭 지역도 32.59 ppb에서 33.52ppb로 증가하였다. 가스상 물질 NO₂의 연간 환경기준은 30 ppb, SO₂의 환경기준은 20 ppb로 논, 밭 지역 모두 연간 평균치를 넘지 않았고, 전체적으로 낮게 나온 경향을 확인할 수 있었다. 초미세먼지의 경우, 논과 밭 지역 모두 연간 대기환경기준을 초과하는 경향을 보였다. 대기환경기준을 초과하는 현상에 대하여, 농업지역만의 초미세먼지 성분 분석과 발생 원인에 대하여 연구가 필요할 것으로 사료된다. 초미세먼지 분석 구명을 통하여 농업지역에서 초미세먼지의 고농도 발생에 대한 원인 규명이 필요하다(Fig. 3).

농업지역과 도심지역의 시간별 변화

본 연구 사이트와 도시 대기질 측정망을 선정하여 계절별 변화를 비교하였다. 농업지역과 도심지역의 계절별 패턴 분석은 전주시 도시대기질 측정망으로 선정하였다. 도시 대기질 측정망은 에어코리아 자료를 사용하였다. 대기오염물질의 계절별 변화

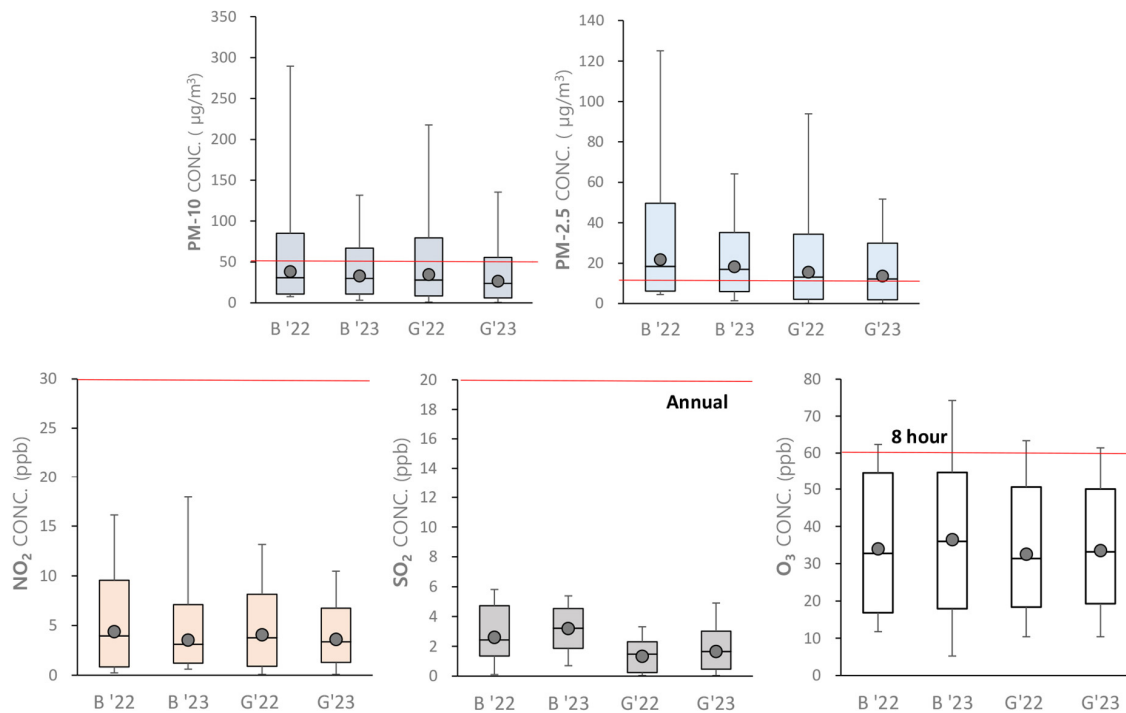


Fig. 3. Comparison of Annual air pollutants between Buan (B') and Gochang (G').

는 봄 3~5월, 여름 6~8월, 가을 9~11월, 겨울 12~2월로, 시간별 측정데이터는 측정데이터의 2년치 평균값으로 나타내었다. Table 3은 농업지역과 도심지역의 계절별 2년치 평균값을 나타내었다. Fig. 4는 논, 밭, 도심지역을 계절별로 나누어서 시간에 따른 입자상 물질의 변화를 나타내었고, Fig. 5는 가스상 물질의 변화를 나타내었다(Table 3).

입자상 물질의 경우, 도심지역과 농업지역이 유사한 패턴을 보이는 것으로 나타났다. 봄철의 경우, 정체성 고기압에 의해 중국에서 미세먼지와 초미세먼지의 유입으로 국내 미세먼지 농도에 영향을 미치고 있다[20]. 이로 인해, 봄철의 입자상 물질의 농도가 다른 계절에 비해, 높게 나온 경향을 볼 수 있다. 외부 요인으로 인해, 도심지역과 농업지역의 입자상 물질의 차이가 미미한 것을 확인할 수 있었다. 봄철의 경우 높게 나타나는 시간은 8~12시경으로 나타났다. 여름철의 경우 논 지역이 도심지역

Table 3. Comparison of average air pollutants between agricultural and urban area

	Spring	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)
Average $\pm$ S.D.	Paddy site(Buan)	48.35 $\pm$ 4.16	22.53 $\pm$ 1.48	4.56 $\pm$ 0.74	3.52 $\pm$ 1.18	43.97 $\pm$ 11.23
	Urban site (Jenju)	48.57 $\pm$ 3.36	20.21 $\pm$ 1.33	9.62 $\pm$ 2.23	2.21 $\pm$ 0.13	42.86 $\pm$ 10.5
	Field site (Gochang)	43.70 $\pm$ 4.9	17.42 $\pm$ 0.96	4.22 $\pm$ 0.69	1.83 $\pm$ 0.61	40.81 $\pm$ 10.23
	Summer	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)
Average $\pm$ S.D.	Paddy site(Buan)	21.38 $\pm$ 1.21	20.10 $\pm$ 1.69	3.61 $\pm$ 0.65	2.31 $\pm$ 0.84	35.99 $\pm$ 8.67
	Urban site (Jenju)	16.24 $\pm$ 0.92	11.85 $\pm$ 0.36	6.75 $\pm$ 0.09	2.24 $\pm$ 0.09	37.11 $\pm$ 9.41
	Field site (Gochang)	17.11 $\pm$ 0.79	8.31 $\pm$ 0.56	2.0 $\pm$ 0.57	0.62 $\pm$ 0.28	32.90 $\pm$ 8.90
	Fall	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)
Average $\pm$ S.D.	Paddy site(Buan)	33.71 $\pm$ 1.21	20.10 $\pm$ 1.69	3.61 $\pm$ 0.65	2.31 $\pm$ 0.84	31.22 $\pm$ 13.68
	Urban site (Jenju)	27.49 $\pm$ 2.83	18.08 $\pm$ 1.51	11.27 $\pm$ 3.07	2.25 $\pm$ 0.15	29.51 $\pm$ 11.05
	Field site (Gochang)	27.41 $\pm$ 3.28	13.77 $\pm$ 1.98	4.07 $\pm$ 0.99	1.45 $\pm$ 0.46	29.52 $\pm$ 12.11
	Winter	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)
Average $\pm$ S.D.	Paddy site(Buan)	38.5 $\pm$ 0.83	24.14 $\pm$ 0.74	5.74 $\pm$ 0.52	2.60 $\pm$ 1.12	29.53 $\pm$ 6.56
	Urban site (Jenju)	42.63 $\pm$ 2.21	24.89 $\pm$ 1.67	16.80 $\pm$ 3.50	2.52 $\pm$ 0.12	24.62 $\pm$ 7.23
	Field site (Gochang)	34.24 $\pm$ 1.78	19.19 $\pm$ 5.73	5.10 $\pm$ 0.83	1.90 $\pm$ 0.63	29.52 $\pm$ 6.29

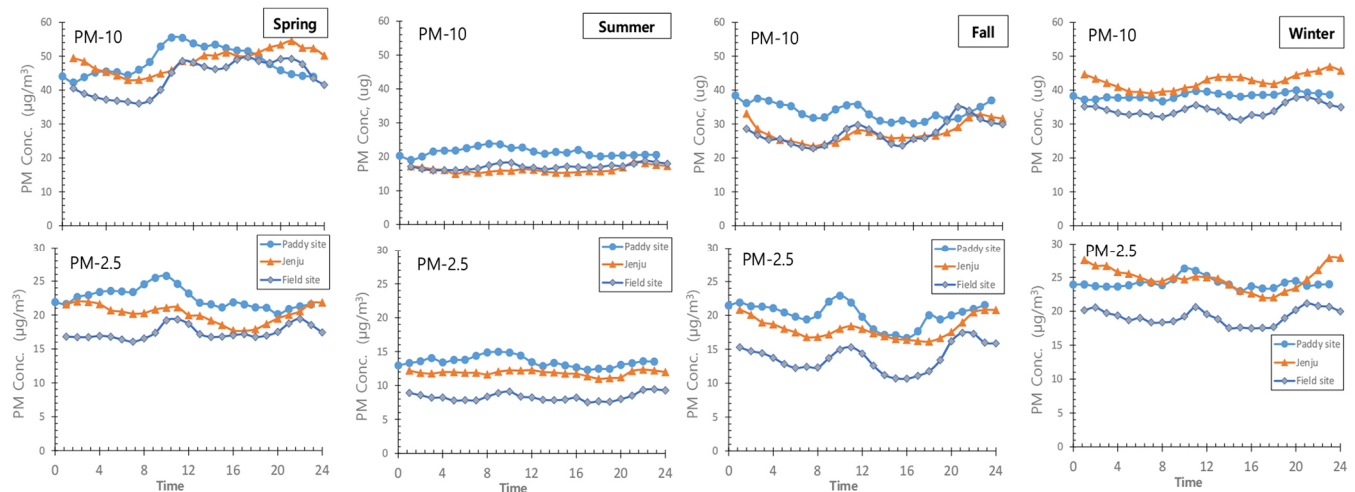


Fig. 4. Comparison of Concentration changes in particulate matter between Urban areas and agricultural areas.

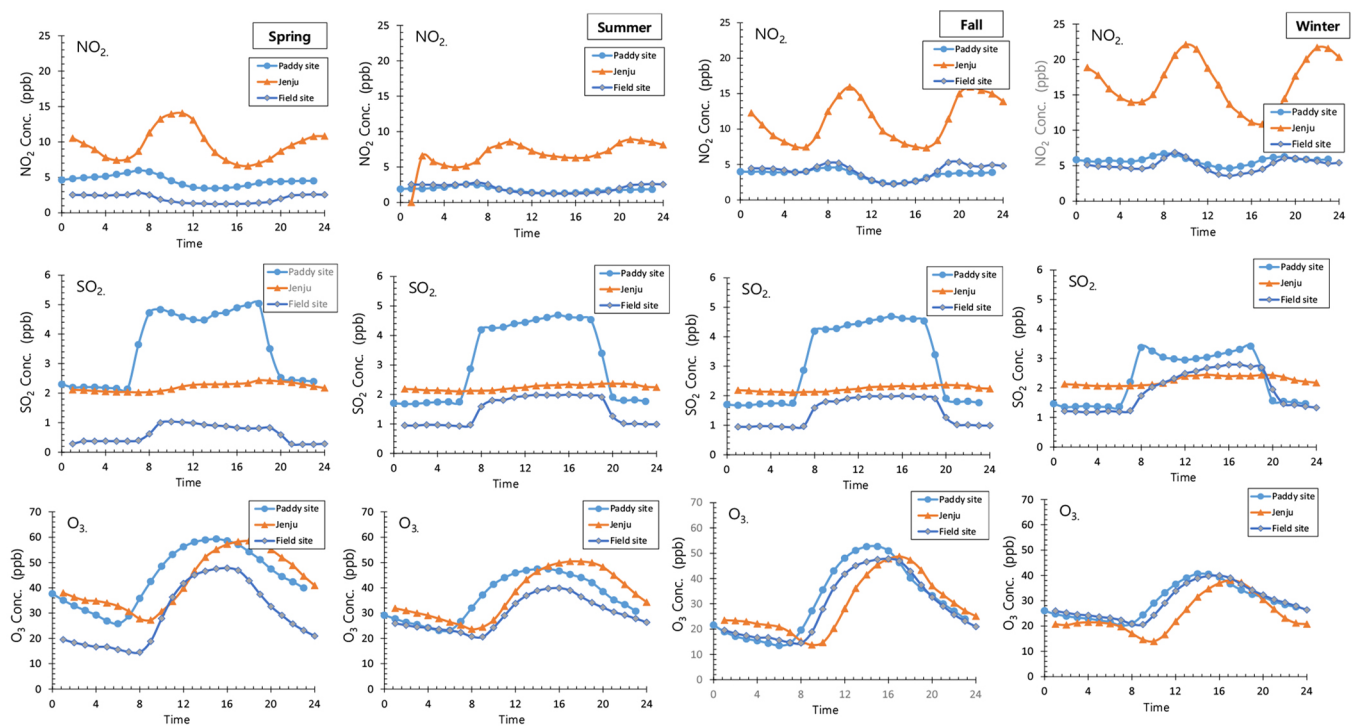


Fig. 5. Comparison of Concentration changes in gaseous pollutant of Urban areas and agricultural areas.

보다 높게 나오는 경향을 보이고 있다. 논 지역이 $48.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $22.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났으며, 밭 지역이 $43.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $17.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮게 나타났다. 이는 논 지역의 여름철에 제초제 살포 및 비료 살포[21]를 통하여 높게 나오는 경향으로 추정하였다. 가을철도 논 지역이 도심지역보다 높은 경향을 나타내며, 논 지역의 경우 가을에 수확으로 인한 농기계 운영 및 농작지 경작으로 인한 비산먼지 증가로 도심보다 발생이 많은 것으로 파악된다. 논 지역이 봄, 여름, 가을에 세 지역 중 가장 높은 농도를 보이고 있으나, 겨울철의 경우 도심지역이 높게 나타난 현상을 확인할 수 있었다. 이는 도심지역의 겨울철 난방에 따른 미세먼지 증가로 판단된다(Fig. 4).

가스상 물질의 경우 도심지역과 농업지역이 상이한 패턴이 나타났다. NO_2 의 경우는 도심지역은 사계절 모두 8~12시, 19~23시경 상승하는 모습을 보여주었다. 도심지역의 출·퇴근 시간에 다량의 차량 통행량 증가에 따른 배출량 증가로 파악된다. 반면 농업지역의 경우, 도심지역의 NO_2 농도의 시간별 패턴과 달리 일정한 경향으로 배출되는 모습을 관찰할 수 있었다. NO_2 의

경우 겨울철의 도심지역이 16.80 ppb로 높게 나타났으며, 사계절 모두 도심지역이 높게 나타났다. SO₂의 경우, 모든 지역이 농도가 낮게 관찰된 모습을 확인할 수 있었다. 하지만 농업지역의 경우 모든 계절에서 8시부터 농도가 서서히 증가하여 20시까지 농도가 일정한 패턴으로 유지되다 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 논 지역이 밭 지역보다 높게 나타난 경향을 볼 수 있었다. 도심지역과 확연히 다른 SO₂의 패턴을 파악할 수 있는데, 이는 농업지역만의 대기질 특성이라 보여진다. 향후 농업지역만의 SO_x 발생패턴과 원인 규명에 관하여 연구가 필요하다고 사료된다. SO₂는 봄철의 논 지역에서 3.52 ppb로 높게 나타났다. O₃의 경우, 도심지역과 농업지역의 시간별 패턴이 유사한 경향이 나타났다. 또한, 봄철과 가을철의 경우 논 지역이 도심지역보다 높게 나타났고, 밭 지역은 겨울철과 가을철에 높게 나타났다. O₃는 13~16시에 증가하는 양상을 보이고 있는데, NO₂의 광분해에 따른 O₃의 생성으로 이어지면서 농도가 증가한다[13]. 또한 가을철과 겨울철의 경우, 논·밭 지역 모두 도심지역보다 O₃ 농도가 높게 나온 경향을 보였다. O₃는 봄철의 논 지역에서 43.97 ppb로 최고농도를 보였고, 겨울철의 도심지역에서 24.62 ppb로 낮게 나타났다. 선행연구의 결과에 따르면, O₃는 NO₂의 광분해 반응에 의하여 여름철에 가장 높은 농도를 보이지만[14], 세 지역 모두 봄철에 높게 나타났다. 평균적으로 온도가 높은 여름철보다는 봄철에 성층권의 O₃ 수송이 활발하여 농도가 증가한다[22] (Fig. 5).

고 찰

현재 국내에서는 도시대기 측정망, 교외대기, 도로변 대기 측정망 등 다양한 대기질 측정소를 운영하고 있지만, 농업지역만의 특성을 분석하는 도시대기질 측정망 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 농업지역에서 발생하는 대기오염물질 농도를 실시간 측정하여 농업지역만의 대기질 특성을 파악하고자 하였다. 24시간 평균치 환경기준 초과횟수는 논 지역 PM-10은 12회, PM-2.5는 69회로 발생하였고, 밭 지역은 PM-10 12회, PM-2.5 27회 발생되었다. 가스상 물질(NO₂, SO₂, O₃) 경우 두 지역 모두 24시간 환경기준을 초과하는 날은 없었다. 연간 대기오염물질 농도의 평균치를 대기환경 국가 기준과 비교하였을 때, 입상상 물질 중 초미세먼지(PM-2.5)만 연간 환경기준을 2년 연속 초과하였고, 가스상 물질은 환경기준을 초과하지 않았다. 이는 초미세먼지의 발생량이 농업지역에서 연간 많이 배출되는 경향을 보이고, 또한 농업 활동에 따른 초미세먼지의 발생 원인을 구명하기 위해 추후 초미세먼지 성분 분석 연구를 진행할 예정이다. 농업지역만의 초미세먼지 고농도 현상의 원인을 파악하고, 초미세먼지 성분 분석 연구를 통해 도심지역과 다른 농업지역만의 대기질 측정소 구축이 필요하다고 사료된다. 국외에서는 농업지역의 경작 활동에 따른 대기오염물질 연구 관련하여 다양한 연구가 진행되고 있다[23,24]. 농업지역과 도심지역의 계절별 시간 패턴 분석으로 볼 때, PM-10과 PM-2.5는 두 지역 모두 유사한 패턴을 보였다. 가스상 물질이 경우 상이한 패턴을 나타냈다. NO₂의 경우, 차량 이동에 따라 농도의 변화를 보였으나, 농업지역의 경우 차량 이동이 많지 않고, 유동 인구가 적으므로 NO₂ 변화가 거의 없었던 동향을 볼 수 있었다. SO₂의 경우, 논 지역과 밭 지역 모두 도심지역과 달리, 오전 8시부터 오후 17시까지 고농도로 상승하는 경향을 볼 수 있었고, 사계절 모두 같은 경향을 보였다. 이는 농업지역만의 특이한 대기질 패턴으로 판단된다. 본 연구에서는 두 개의 농업지역만 분석하였기 때문에, 농업지역을 대표한다고 정의할 수 없다. 본 연구 결과를 토대로 도심지역과 농업지역의 농도 배출 특성과 발생 원인이 다르기 때문에 앞으로 국내의 농업지역만의 대기질 측정소 구축을 점진적으로 구축하는 것이 필요하다고 사료된다. 농업지역 대기오염물질의 배출량 파악과 특성 분석을 통해, 농업지역의 초미세먼지 발생 요인 파악 및 생성기작 구명에 중요한 기초자료로 활용될 것이라 판단된다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: L.-H.M. conceived and designed the research; K.-H.W. led the experiment; L.-H.M. and K.-M.W. wrote the first manuscript, revised the manuscript, led the field investigation, analysis, prepared the sample; L.-H.M., K.-H.W. and K.-M.W. performed the off-site consequence analysis; L.-H.M., K.-M.W. performed the statistical analysis; L.-H.M. and K.-H.W. collected the data; K.-J.H. and K.-M.W. provide critical feedback.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2022-RD010418)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.19>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Min-Wook Kim.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

- Guk DJ, Yu DG (2002) Development and promotion of environmental agriculture. Korean Association of Organic Agriculture, 2002.12a, 26-50.
- Aneja VP, Schlesinger WH, Erisman JW (2009) Effects of agriculture upon the air quality and climate: Research, policy, and regulations. *Environmental Science & Technology*, 43(12), 4234-4240. <https://doi.org/10.1021/es8024403>.
- Kim MW, Yu GH, Kim JH, Song MG, Oh SH, Choe SY, Jeon HJ, Bae MS (2023) Seasonal measurement of ammonia concentration and its relationship with ammonium in the field areas of Jeollabuk-do. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 1050-1061. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.1050>.
- Dockery DW, Pope CA (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of Public Health*, 15, 107-132.
- Kwon HJ, Cho SH, Chun Y, Lagarde F, Pershagen G (2002) Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul. *Environmental Research*, 90, 1-5. <https://doi.org/10.1006/enrs.2002.4377>.
- Park SY (2024) Diurnal change patterns of atmospheric PM10 concentrations in metropolitan cities: A case study of Busan and Daegu metro areas. *Korean Association of Regional Geographers*, 30(1), 11-23. <https://doi.org/10.26863/JKARG.2024.2.30.1.11>.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2021) National Air Pollutants Emission. Available online: <https://www.air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30> (accessed on July, 2024)
- Park SH, Kim SC, Kim DS (2022) A study on the characteristics of local air pollutants according to the analysis of Gunsan air pollutants network data (2017-2019). *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 421-436. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.421>.
- Kang BY, Lee HS (2015) Source apportionment of fine particulate matter (PM2.5) in the Chungju city. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 437-448. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.5.437>.
- Dockery DW, Pope CA, Xu XP, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris Jr BG, Speizer FE (1993) An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, 329, 1753-1759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>.
- Seo WM, Shon ZH, Song SK (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>.
- Fuchs H, Ball SM, Bohn B, Brauers T, Cohen RC, Dorn HP, Dube WP, Fry JL, Haseler R et al. (2010) Intercomparison of measurements of NO₂ concentrations in the atmosphere simulation chamber SAPHIR during the NO₃Comp campaign. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(1), 21-37. <https://doi.org/10.5194/amt-3-21-2010>.
- Kim DS, Jeong JS, Ahn JY (2016) Characteristics in atmospheric chemistry between NO, NO₂ and O₃ at an urban site during MAPS (Megacity Air Pollution Study)-Seoul, Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 422-434. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.422>.
- Oh YG, Park JS, Hong SU (2020) Study on the development of an agricultural ammonia emission inventory and regional emission factor estimation model for responding to fine dust in the agricultural sector. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 62(2), 24-31.
- Demerjian KL (2000) A review of national monitoring networks in North America. *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 1861-1884. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00452-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00452-5).
- Ju JH, Hwang IJ (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. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.5.545>.
- Korea Environment Corporation (KME) (2022) Guideline on Installation and Operation of Air Pollution Monitoring Network.
- Kim EH, You SH, Kang YH, Son KW, Kim ST (2021) Municipality-level source apportionment of PM2.5 concentrations based on

- the CAPSS 2016: (IV) Jeollabuk-do. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 292-309. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.292>.
19. Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2021) Number of Farms and Area of Facility Crop Cultivation.
20. Park SN, Shin HJ (2017) Analysis of the factors influencing PM_{2.5} in Korea: Focusing on seasonal factors. *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(1), 227-248. <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.1.227>.
21. Rural Development Administration (RDA) (2020) Rice Quality Enhancement Technology.
22. Lee GW, Park JH, Kim DG, Koh MS, Lee MH, Han JS, Kim JC (2020) Current status and future directions of tropospheric photochemical ozone studies in Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 419-441. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.419>.
23. Zhang P, Xu H, Hu Z, Chen Y, Cao M, Yu Z, Mao E (2021) Characteristics of agricultural dust emissions from harvesting operations: Case study of a whole-feed peanut combine. *Agriculture*, 11(11), 1068. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111068>.
24. Bogman P, Cornelis W, Rollé H, Gabriels D (2005) Prediction of TSP and PM₁₀ emissions from agricultural operations in Flanders, Belgium. *Proceedings of the 14th International Conference: Transport and Air Pollution*, Graz, Austria.