

Research Article



CrossMark

Open Access

농업지역(밭) 암모니아 등 대기오염물질 계절별 모니터링 연구

김민욱, 김진호, 김경식, 홍성창*

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과

Study on the Emission Characteristics of Air Pollutants from Agricultural Area

Min-Wook Kim, Jin-Ho Kim, Kyeong-Sik Kim and Sung-Chang Hong* (Climate Change & Evaluation Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 6 September 2021/ Revised: 24 September 2021/ Accepted: 27 September 2021

Copyright © 2021 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

ORCID

Min-Wook Kim
<https://orcid.org/0000-0001-8262-5909>

Kyeong-Sik Kim
<https://orcid.org/0000-0002-1463-8617>

Jin-Ho Kim
<https://orcid.org/0000-0002-5266-1586>

Sung-Chang Hong
<https://orcid.org/0000-0002-9042-1284>

Abstract

BACKGROUND: Fine particulate matter (PM_{2.5}) is produced by chemical reactions between various precursors. PM_{2.5} has been found to create greater human risk than particulate matter (PM₁₀), with diameters that are generally 10 micrometers and smaller. Ammonia (NH₃) and nitrogen oxides (NO_x) are the sources of secondary generation of PM_{2.5}. These substances generate PM_{2.5} through some chemical reactions in the atmosphere. Through chemical reactions in the atmosphere, NH₃ generates PM_{2.5}. It is the causative agent of PM_{2.5}. In 2017 the annual ammonia emission recorded from the agricultural sector was 244,335 tons, which accounted for about 79.3% of the total ammonia emission in Korea in that year. To address this issue, the agricultural sector announced the inclusion of reducing fine particulate matter and ammonia emissions by 30% in its targets for the year 2022. This may be achieved through

analyses of its emission characteristics by monitoring the PM_{2.5} and NH₃.

METHODS AND RESULTS: In this study, the PM_{2.5} concentration was measured real-time (every 1 hour) by using beta radiation from the particle dust measuring device (Spirant BAM). NH₃ concentration was analyzed real-time by Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS). The concentrations of ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂) were continuously measured and analyzed for the masses collected on filter papers by ultraviolet photometry and chemiluminescence.

CONCLUSION: This study established air pollutant monitoring system in agricultural areas to analyze the NH₃ emission characteristics. The amount of PM_{2.5} and NH₃ emission in agriculture was measured. Scientific evidence in agricultural areas was obtained by identifying the emission concentration and characteristics per season (monthly) and per hour.

*Corresponding author: Sung-Chang Hong
Phone: +82-63-238-2501; Fax: +82-63-238-3823;
E-mail: schong@korea.kr

Key words: Agriculture, Ammonia, Crop Land, Monitoring, Fine Particulate Matter

서론

연구 방법론

2017년 기준, 농업부문 연간 암모니아 배출량은 244,335 톤으로 우리나라 전체 암모니아 배출량의 약 79.3%를 차지하고 있다. 선행 연구에 의하면 농업은 전 세계 암모니아 배출량의 80%를 차지하는 것으로 나타났다[1]. 암모니아는 초미세먼지(PM_{2.5})의 생성 원인물질로 대기 중 반응을 통하여 초미세먼지를 발생시킨다[2]. 환경부 국가미세먼지정보센터에 따르면, 최근 10년간의 추세는 뚜렷한 주기성을 보이지 않으며 전체적으로 소폭 증가하는 것으로 나타났다(환경부, 2020). 다만, 최근에는 전 세계적으로 COVID-19 (Coronavirus Disease-19)가 유행하면서 지역별로 상이한 사회 여건 변화는 대기오염물질의 배출량 및 농도에도 중요한 영향을 미칠 수 있다[3].

그동안 농업분야에서 암모니아는 악취원인 물질과 질소비료로 인한 토양, 하천 오염 정도로 인식되다가 2019년 초부터 초미세먼지 원인물질로 지목을 받으면서 이에 따른 각종 대책 방안을 수립하고 있다. 농업부문에서는 2022년까지 농축산분야 초미세먼지와 암모니아 배출량 30% 감축 목표를 제시하며 관련 기초연구들이 진행되고 있다. 감축목표를 달성하기 위해 암모니아 등 대기질 모니터링을 통해 농업부문에서 발생하는 미세먼지와 2차 생성물질에 대한 배출특성 분석이 선행되어야 한다. 2021년 6월 기준, 전국에 약 600여개의 대기오염측정망(도시대기, 국가배경농도, 도로변대기 등)이 있고, 운영관리도 선진국에 뒤지지 않는 수준에 도달했다[4]. 정밀한 대기오염측정을 위해 지자체별로 지속적으로 측정망을 확충하고 있으나 [5] 농업대기를 위한 측정망은 전무한 상태이다.

농업의 다양한 생산 활동과정에서 상당량의 암모니아 및 대기오염물질이 발생된다고 알려져 있으나, 발생현황 및 전환기작 관련 과학적 데이터가 부족한 상황이다. 본 연구는 농업부문의 부족한 과학적 자료를 확보하기 위해, 농업지역(밭)에서 발생하는 초미세먼지(PM_{2.5})와 2차 생성물질의 계절별(월별), 시간별 배출농도 및 특성을 파악하였고 전라북도에서 가장 넓은 밭 면적을 가지고 있는 고창군에 대기오염물질 모니터링 체계를 구축하였다. 측정물질은 초미세먼지(PM_{2.5}), 암모니아(NH₃), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃) 이며 2020년 6월 ~ 2021년 6월까지 약 1년간 모니터링을 실시하였다. 추가적으로 약 14 km 떨어진 인근 도시 대기측정망과 자료와 비교분석을 진행하여 배출특성, 배출량 등의 과학적 근거 자료를 확보할 수 있었다.

농업지역 대기질 모니터링 측정소 선정

전북의 대기오염물질 주요 배출원으로 농축산 활동, 농업잔재물 소각 등 농업부문의 배출이 많은 것으로 알려져 있다 [6]. 농업지역 대기질 모니터링 측정소 선정은 대기오염측정망 설치·운영지침(환경부, 2021)에 의거 산업단지, 차량 배출원 등의 영향을 최소화 시켰으며, 측정항목별 시료채취구 선정방법을 충족시켰다. 측정지점은 밭을 대표하는 지역으로 고창군(고창군 대산면 칠거리로 70)으로 선정하였으며, 고창군의 경우 전라북도 내에서 10,392 ha로 가장 넓은 밭 면적을 가지고 있다(KOSIS, 2019). 측정지점을 기준으로 남쪽으로 약 900 m 이격된 거리에 작은 마을이 있고 북쪽으로는 약 850 m 이격된 거리에 소규모 목장이 위치하고 있다. 반경 5 km 이내로는 작은 마을을 제외한 소도시 및 산업단지가 없어 전형적인 밭농사 지역이다(Fig. 1).

우리나라는 계절에 따라 주 풍향이 북서풍과 남동풍 사이에서 변하며, 계절별로 유입된 입자의 특성도 다르게 나타난다 [7]. 2020년 6월부터 2021년 6월까지의 고창군의 계절별 바람장미도를 살펴보면, 여름('20. 6~8월) 주풍은 동서풍, 가을('20. 9~11월) 주풍은 북서풍, 겨울('20. 12~ '21. 2월) 주풍도 북서풍이며 그리고 봄('21. 3~5월) 주풍은 북동풍을 제외한 모든 곳에서 균일하게 관측되었다. 사계절 대부분 0~4 m/s의 낮은 풍속이 관측되었다.

농업지역 대기질 모니터링 체계 구축

농업부문은 대기오염물질 발생량의 17%, 암모니아 배출량의 79.3%를 차지하고 있으나, 과학적 자료가 부족하여 농업지역 대기질 모니터링 체계 구축을 통해 물질별 농도, 배출량 등의 근거 자료가 필요한 시점이다. 하지만, 2021년 6월 기준, 우리나라 대기오염측정망 운영체계를 살펴보면, 전국 162개 시·군에 설치된 600여개 측정망(도시대기(495), 국가배경농도(11), 교외대기(27), 도로변대기(52), 항만(15))을 운영하고 있으나 농업대기 대상 대기오염측정망은 전무한 상태이다. 따라서 농업지역(밭) 암모니아 등 대기질 모니터링을 위해 대기질 집중측정소를 설치하였다. 측정기간은 2020. 6. 9. ~ 2021. 6. 31. 까지이며 각 물질별, 계절별, 일별 특성 분석을 진행하였다.

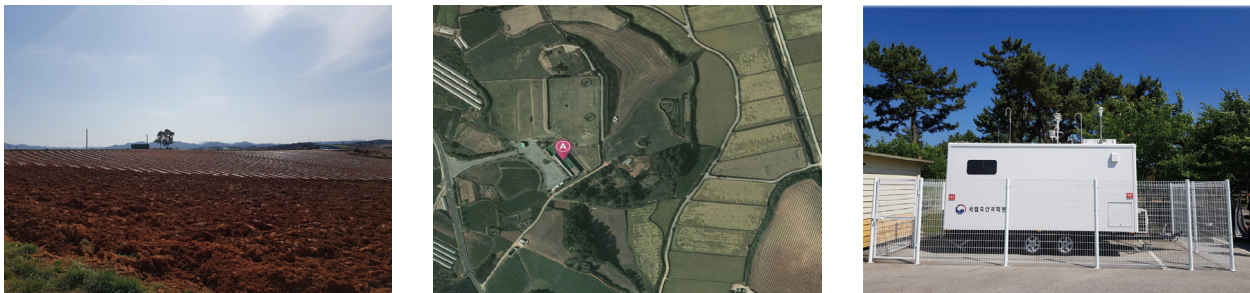


Fig. 1. Air pollution measurement network selection in Agricultural area.

PM_{2.5} 농도는 미세먼지 측정기기(Spirant BAM)를 통해 필터지에 수집된 입자질량을 베타방사선을 사용하여 실시간(1시간 간격)으로 측정하고, NH₃는 공동감쇠분광감도법(CRDS, Cavity Ring-Down Spectroscopy)을 이용하여 대기중 NH₃ 농도를 실시간으로 측정했다. 가스상물질(O₃, NO₂)은 각각 자외선광도법, 화학발광법을 통해 연속적으로 농도를 측정 및 분석한다. 본 연구(농업대기)에서 측정·분석된 자료는 인근 도시대기측정망(고창읍 월곡공원 1길) 측정 자료와 대기오염물질 배출 특성 비교 분석을 실시하였다.

토양분석 방법

신뢰도 높은 토양분석을 위해 화학분석의 각 과정도 중요하지만 정확한 시료 채취가 선행되어야 한다. 시료채취는 넓은 면적의 포장에서 아주 적은 일부만을 채취하여 전체 포장의 상태를 대표해야 하기 때문이다(농촌진흥청, 2011). 시료채취 장소가 경사가 있기 때문에 상부-중부-하부로 나누어 각 지점에서 표토(0~15 cm)와 심토(15~30 cm)를 각각 3회 채취하여 토양분석(pH, EC, 유기물, 유효인산, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺, T-N)을 진행하였다.

결과 및 고찰

토양분석 결과

본 연구의 대기질 모니터링 측정소 주변 토양의 특성을 파악하기 위해 토양분석을 실시하였다(Table 1). 수소이온지수(pH)는 양분의 공급의 척도가 되는 지표로 생육에 필요한 pH는 작물별로 상이하지만 일반적으로 6.0~6.5 사이에 집중되어 있으며, 분석결과 토양 화학적 적정 범위인 것으로 나타났다. 토양중의 수용성염류의 총량을 나타내는 전기전도도(EC)를 포함하여 유기물(OM), 마그네슘(mg²⁺) 모두 토양 화학적 적정 범위였다.

작물의 초기생육에 중요한 유효인산과 토양의 pH 교정역할을 하는 칼슘(Ca²⁺)과 칼리(K⁺) 경우 2020년 대비 1~4배 까지 토양 화학적 적정 범위를 초과하는 것으로 분석되었다.

PM_{2.5} 분석결과

일반적으로 배출량, 기상조건 그리고 대기 경계층 높이 등은 계절에 따라 크게 변하므로 한 측정지점에서 PM_{2.5}의 농도 및 화학적 성분들의 농도는 계절변화를 수반한다[8]. 계절별, 월별 농업지역(밭)의 PM_{2.5} 농도 분포를 나타냈다(Fig. 2). 계절별 PM_{2.5} 평균농도는 봄(30.2 µg/m³), 겨울(27.8 µg/m³), 가을(22.9 µg/m³) 그리고 여름(14.4 µg/m³) 순으로 나타났다. 인근 도시대기측정망 PM_{2.5} 자료와 비교한 결과, 농업지역(밭)의 PM_{2.5} 월별 평균 농도가 여름을 제외하고는 모두 높게 나타났다. 두 측정소 간의 계절별 PM_{2.5} 평균 농도의 차이는 여름(14.5%), 가을(27.0%), 겨울(25.5%), 봄(31.1%)으로 봄철에 가장 많은 차이가 나타났으며, 20년 8월 PM_{2.5} 농도를 제외하고는 월별 농도 패턴은 거의 유사한 경향을 보였다. 20년 7월~9월 사이 장마로 인한 강수가 주기적으로 발생되었고 세정효과로 인해 PM_{2.5} 농도가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다. 20년 7월 누적강수량은 45 mm(19일/31일), 8월은 362 mm(15일/31일) 그리고 9월은 227 mm(13일/31일)으로 관측되었다.

시간별 PM_{2.5}의 농도 분포를 나타냈다(Fig. 3). 시간별 농도 변화를 보면 계절별로 모두 다른 특징을 보이고 있다. 여름과 봄은 상대적으로 가을, 겨울철보다 시간별 PM_{2.5} 농도가 변화의 폭이 크지 않는 것으로 확인 할 수 있다. 시간별 PM_{2.5} 농도 표준편차는 여름(5.3 µg/m³), 가을(10.9 µg/m³), 겨울(18.0 µg/m³), 봄(6.3 µg/m³)이며 시간에 따른 농도 변화는 겨울, 가을 봄 그리고 여름 순으로 나타났다. 계절별로 PM_{2.5}

Table 1. Soil analysis report

Classification	sample number	pH	EC	OM	P ₂ O ₅	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	T-N
			dS/m	g/kg	mg/kg	cmol/kg	cmol/kg	cmol/kg	cmol/kg	%
Field (2020)	Topsoil 1-1	6.7	1.4	15.5	618.7	7.88	1.39	2.27	0.10	-
	Topsoil 1-2	6.7	0.8	10.6	151.9	6.69	0.81	2.31	0.10	-
	Topsoil 1-3	6.1	0.6	4.9	214.6	4.04	0.47	1.13	0.03	-
	Average	6.5	0.9	10.3	328.4	6.206	0.89	1.902	0.074	-
Field (2021)	Topsoil 2-1	7.2	1.1	24.6	688.4	9.41	1.14	2.06	0.09	0.17
	Subsoil 2-2	7.2	1.1	23.3	758.4	10.07	1.26	2.12	0.09	0.08
	Topsoil 3-1	7.1	0.6	18.2	614.6	8.28	0.80	1.87	0.06	0.19
	Subsoil 3-2	7.1	0.8	20.7	740.6	9.05	0.96	2.00	0.07	0.14
	Topsoil 4-1	7.1	0.7	19.9	900.1	8.61	0.90	1.96	0.06	0.21
	Subsoil 4-2	7.0	0.9	25.8	961.2	8.81	0.97	2.04	0.08	0.05
	Average	7.1	0.9	22.1	777.2	9.0	1.0	2.0	0.1	0.1
	Range of soil chemical characteristic	6.0~7.0	2	20~30	300~550	5.0~6.0	0.50~0.80	1.5~2.0	-	-

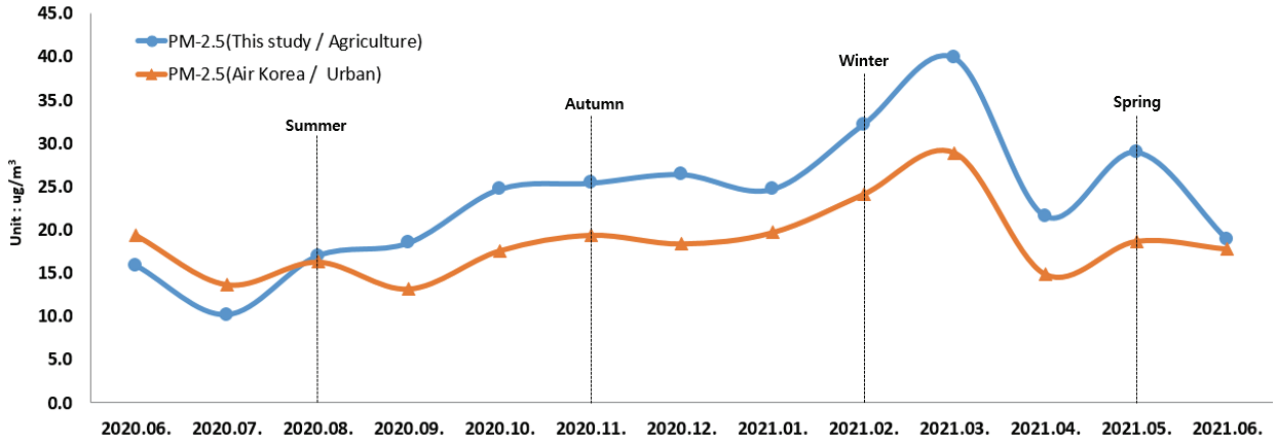
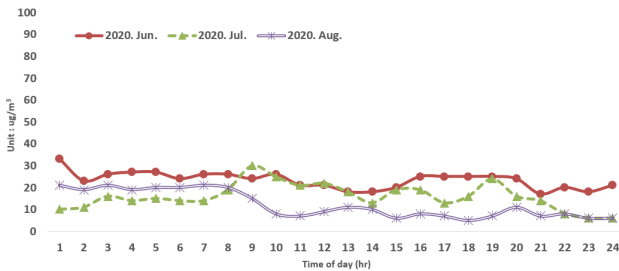
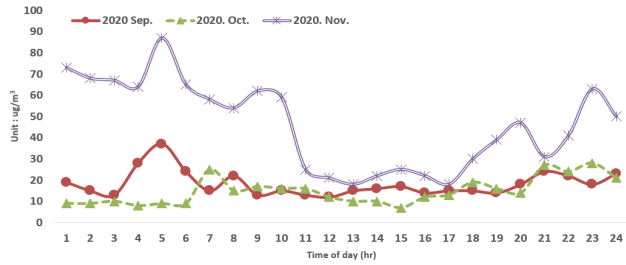


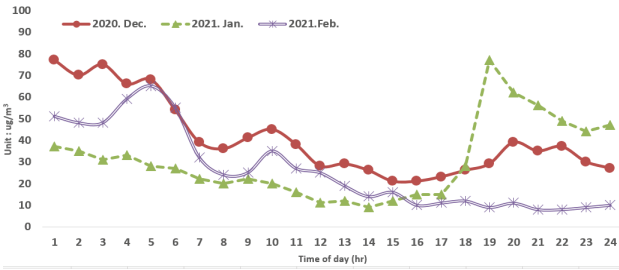
Fig. 2. PM_{2.5} concentration by four season in agricultural area.



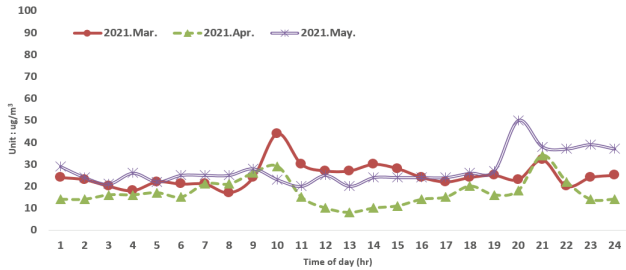
(a) Summer



(b) Autumn



(c) Winter



(d) Spring

Fig. 3. Hourly graph of PM_{2.5} concentration.

농도의 차이는 있지만, 일반적으로 새벽 및 야간 시간에 PM_{2.5} 농도가 높게 관찰되었는데 이는 기온역전층에 의한 현상 때문 일 것으로 판단된다[9].

NH₃ 분석결과

계절별, 월별 농업지역(밭)의 NH₃ 농도 분포를 나타냈다 (Fig. 4). 계절별 NH₃ 평균농도는 봄(21.7 ppb), 겨울(17.8 ppb), 가을(11.0 ppb) 그리고 여름(8.9 ppb) 순으로 나타났다. NH₃는 온도의 영향을 많이 받는 물질로 일반적으로 여름철 높은 농도를 유지하나, 20년 7월~9월 사이 긴장마로 인해 강수가 내린 후에는 NH₃ 농도가 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 NH₃는 물에 잘 녹는 성질을 가지고 있기 때문이다. 또한, 암모니아는 온도의 영향을 많이 받기 때문에 봄철

의 NH₃ 농도가 겨울, 가을철보다 상대적으로 높은 것으로 나타났다으며 봄철의 경우 농업활동이 시작되어 암모니아 배출원이 많아지는 시기이기 때문이다. 또한, NH₃와 NO_x, NO의 월별 농도 경향성이 상당히 유사한 것으로 나타났다.

시간에 따른 NH₃ 농도를 살펴보면 여름, 겨울철은 새벽의 NH₃ 농도가 다른 시간대에 비해 상대적으로 높았으며, 이른 오전시간까지 높은 농도를 유지하다 정오가 되면서 농도가 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 5). 가을철 시간별 NH₃ 농도 표준편차는 1.5 ppb로 시간에 따른 농도는 비교적 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 봄철은 새벽과 이른 오전에 낮은 농도를 보이는 것은 혼합층의 영향으로 판단된다. NH₃는 일출 이후 높아진 혼합층 확장을 통해 상·하층 공기가 희석되어 NH₃ 농도가 낮아지다 저녁 이후 혼합층이 축소됨에 따

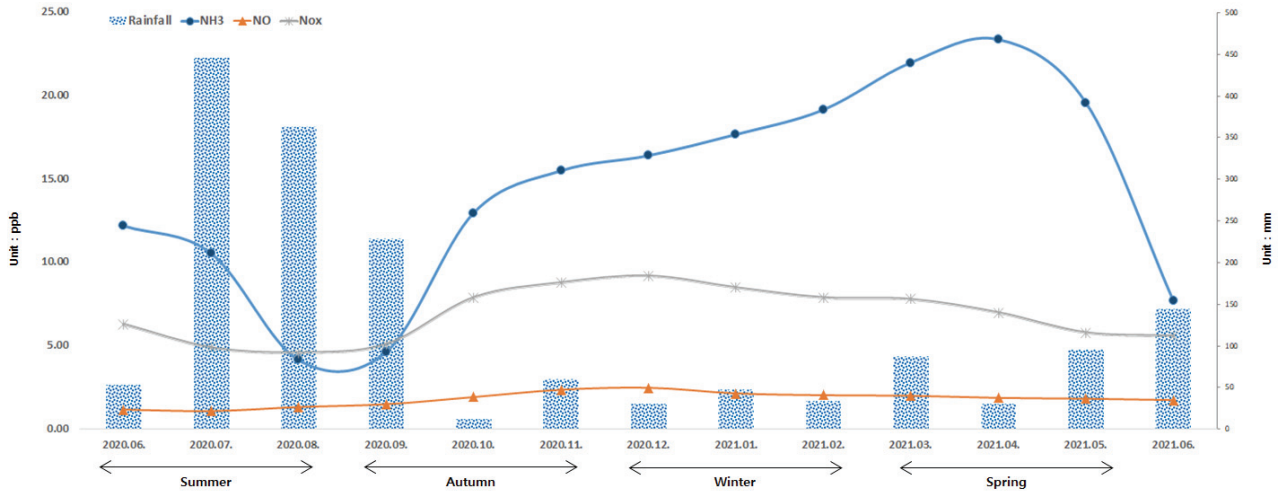


Fig. 4. NH₃ concentration by four season in agricultural area.

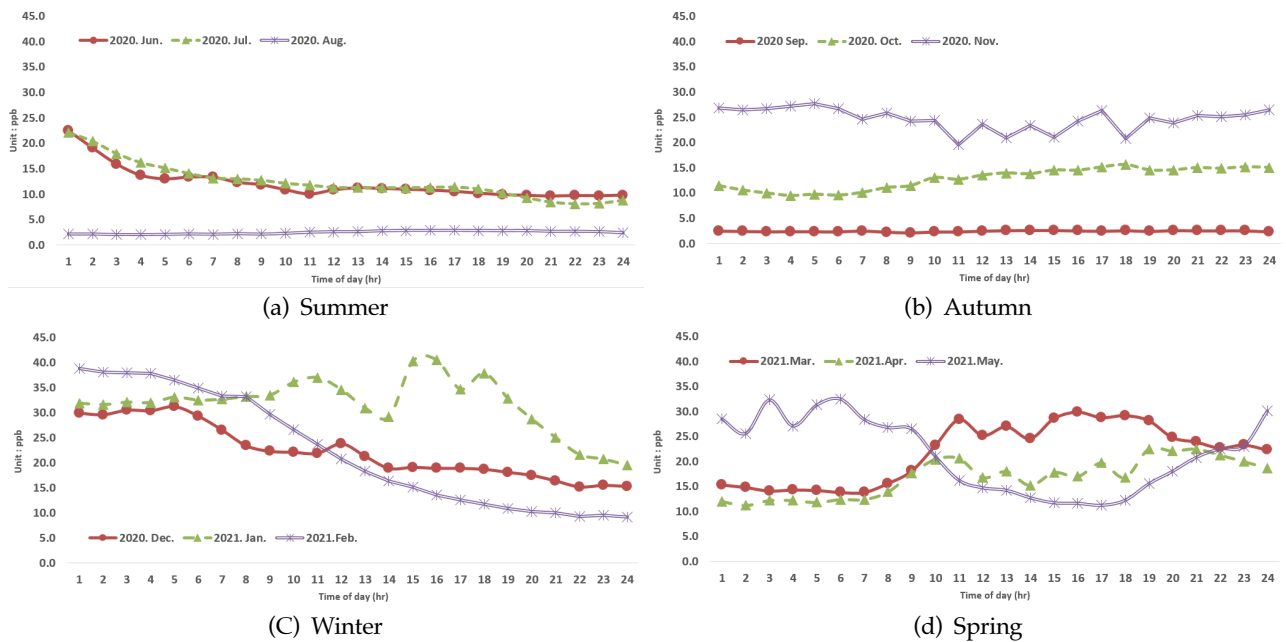


Fig. 5. Hourly graph of NH₃ concentration.

라 농도가 상승하기 때문이다. 또한 농업활동이 활발한 시기로 토양 비료 성분에서의 배출되는 영향도 있는 것으로 추정된다.

NO₂ 분석결과

계절별, 월별 농업지역(밭)의 NO₂ 농도 분포를 나타냈다(Fig. 6). 계절별 NO₂ 평균농도는 겨울(6.3 ppb), 가을(5.2 ppb), 봄(4.9 ppb) 그리고 여름(3.4 ppb) 순으로 나타났다. 인근 도시대기측정망 NO₂ 자료와 비교한 결과 '20년 10월을 제외하고는 도시대기 NO₂ 농도보다 농업지역 농도가 낮은 것으로 나타났다. NO₂는 대표적인 도시공해 물질로 자동차, 발전소 등 연소과정 중 발생되기 때문에 농업지역보다 상대적으

로 높은 것으로 판단된다. 농도의 차이는 있지만 계절별, 월별 두 측정소 간의 농도 경향은 거의 유사한 경향을 보였다. 두 측정소 간의 계절별 NO₂ 평균농도의 차이는 여름(55.8%), 가을(34.6%), 겨울(73.0%), 봄(36.7%) 으로 겨울, 여름철이 가장 많은 차이가 나타났다.

시간별 NO₂의 농도 분포를 나타냈다(Fig. 7). 시간별 NO₂ 농도 표준편차는 여름(1.4 ppb), 가을(2.3 ppb), 겨울(1.6 ppb), 봄(1.5 ppb)으로 전체적으로 농도차이는 크지 않았다. 새벽 및 이른 오전시간까지 높은 농도를 유지하다가 정오를 기준으로 농도가 낮아져 일정하게 유지되는 경향을 보이다가 저녁시간에 다시 농도가 상승하는 것으로 나타났다. 이는 낮 시간과 저녁시간에 발생하는 혼합층과 광화학 반응의 증감으로 인한 것으로

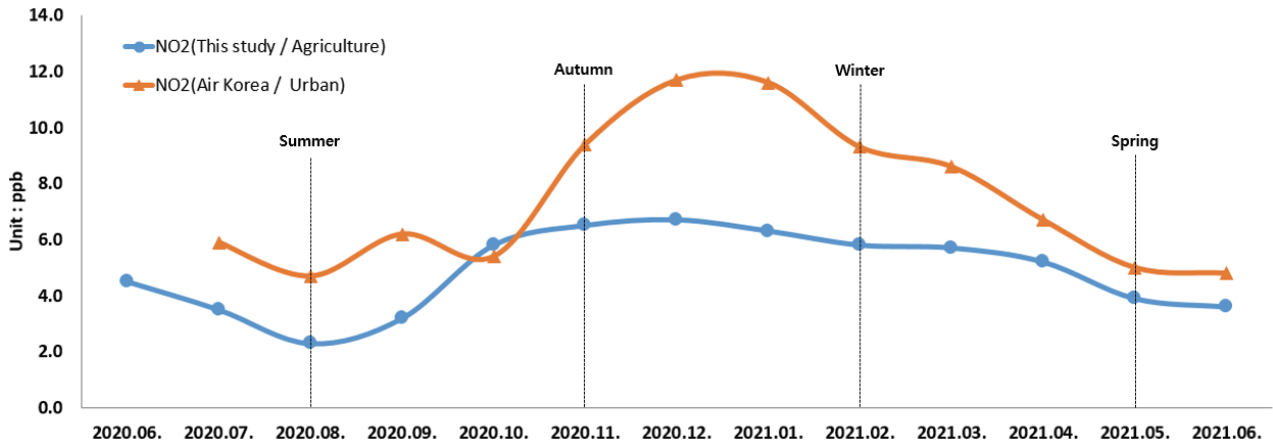


Fig. 6. NO₂ concentration by four season in agricultural area.

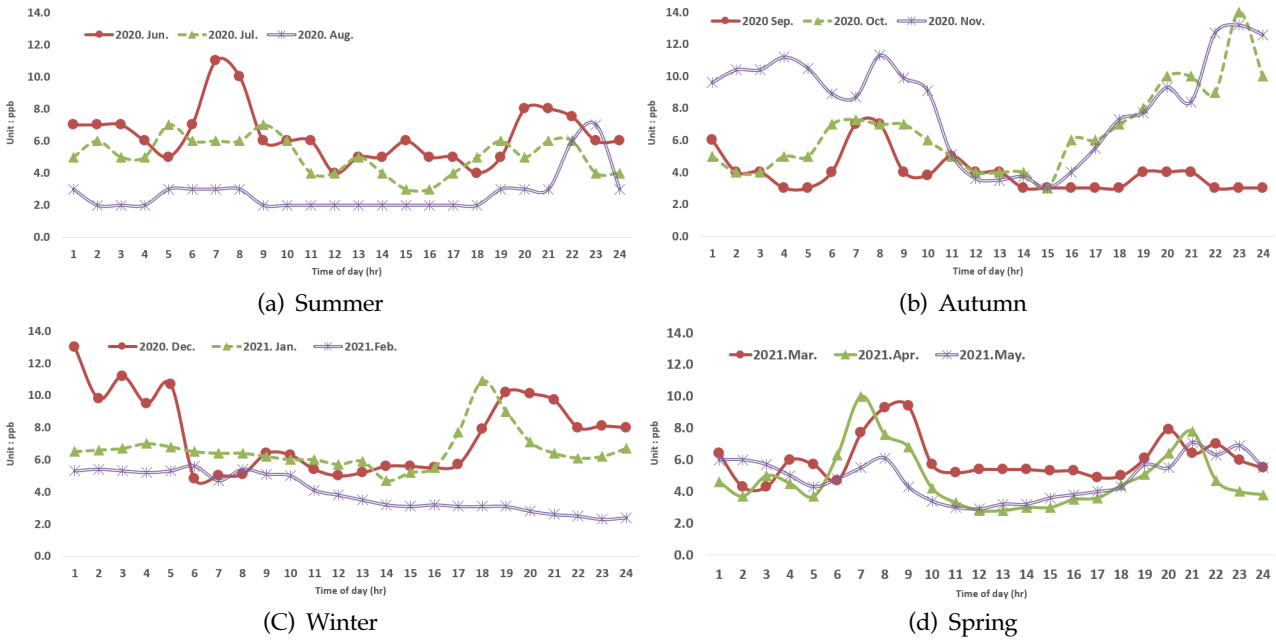


Fig. 7. Hourly graph of NO₂ concentration.

판단된다. 또한, NO₂의 최대 농도는 늦은 저녁시간대 사이로 NO와 비교해 약 1~2시간 늦게 나타나는 경향을 보였는데 이는 광화학반응에 의해 NO가 NO₂로 변화하기 때문인 것으로 추정된다.

O₃ 분석결과

오존은 인체, 농작물, 생태계에 악영향을 미치며 세계 각국은 오존을 규제 대상 대기오염물질로 규정하고 있다[10]. 계절별, 월별 농업지역(밭)의 O₃ 농도 분포를 나타냈다(Fig. 8). 계절별 O₃ 평균농도는 봄(51.0 ppb), 가을(34.4 ppb), 겨울(34.0 ppb) 그리고 여름(29.6 ppb) 순으로 나타났다. 인근 도시대기측정망 O₃ 자료와 비교하였다. 여름철을 제외하고 농업지역의 O₃ 농도가 도시대기 농도보다 다소 높게 나타나는 경

향을 보였으나 두 측정소간의 계절별 O₃ 농도의 차이는 여름(11.4%), 가을(2.0%), 겨울(7.3%), 봄(7.5%) 으로 거의 유사한 경향을 보였다.

시간별 O₃의 농도 분포를 나타냈다(Fig. 9). 시간별 O₃ 농도 표준편차는 여름(18.5 ppb), 가을(17.6 ppb), 겨울(9.8 ppb), 봄(22.3 ppb)순으로 시간별 농도차이가 큰 것으로 나타났다. O₃은 새벽과 이른 오전에는 낮은 농도를 유지하다가 12~19시에 증가 그리고 저녁시간대에 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 O₃의 광화학반응인 것으로 판단된다. O₃ 생성과정은 대기 중의 일산화질소(NO)가 산화되어 이산화질소(NO₂)를 생성하게 되며 NO₂의 농도가 감소하기 시작할 때 O₃이 생성된다. 따라서 시간별 NO₂, O₃ 농도는 서로 반대의 경향을 보인다. 오전에는 NO₂ 농도가 높고 온도가 상

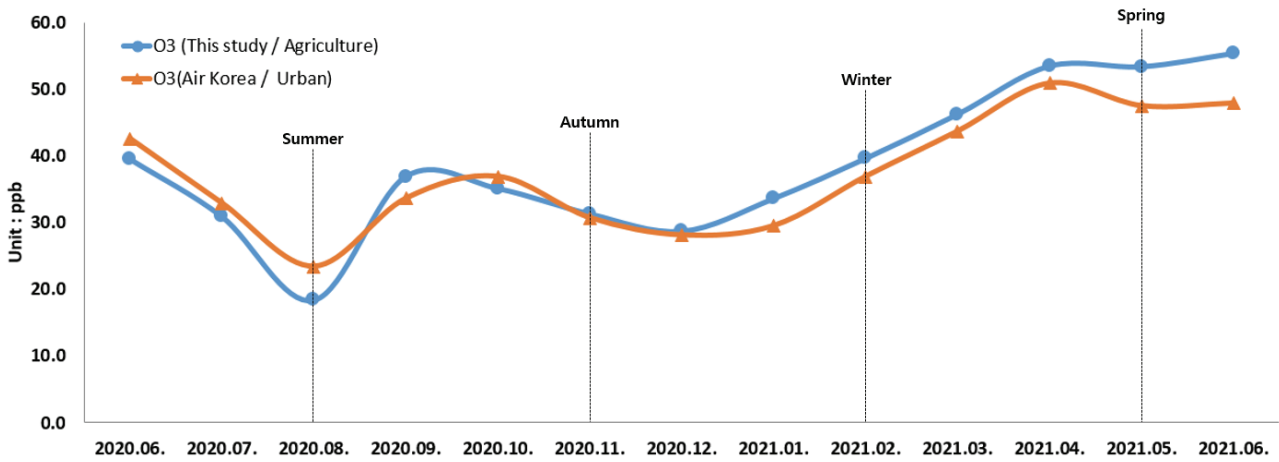


Fig. 8. O₃ concentration by four season in agricultural area.

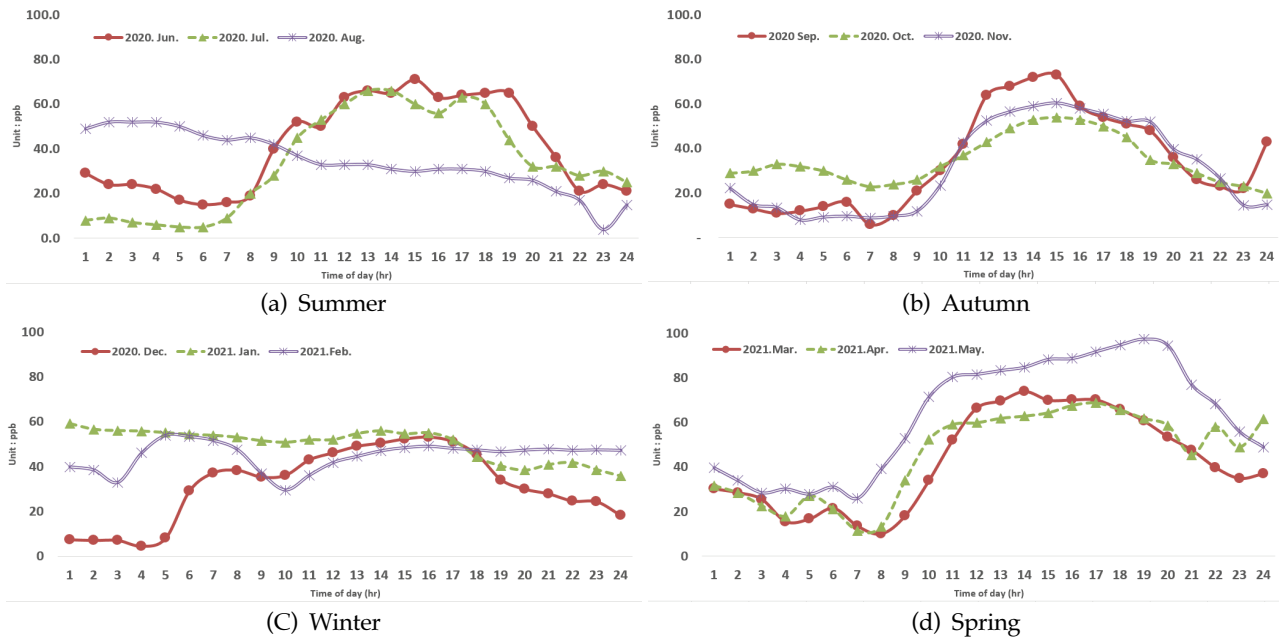


Fig. 9. Hourly graph of O₃ concentration.

증가면서 광화학반응에 의해 오후부터는 O₃ 농도가 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 농도의 차이는 있지만 사계절 모두 시간별 O₃ 농도는 유사한 패턴을 나타내고 있다.

농업지역(밭)에서 발생하는 암모니아 등 대기오염물질 농도를 정확하게 측정·분석하고자 하였다. 특히 배경 지역의 계절별(월별), 시간별 배출 농도 및 특성을 제공함으로써 저감 적정 농도를 제시하는 중요한 자료로 사용될 것으로 판단된다. 연구 결과, 농업지역의 미세먼지 발생과 대응을 위한 과학적 근거 자료를 확보하였으며, 초미세먼지와 2차생성 원인 물질인 암모니아 발생억제를 위한 기초기반 자료제공을 할 수 있을 것으로 판단된다. 향후, 지속적인 대기오염물질 모니터링을 통해 농업지역의 주요 대기오염물질 발생 현황 예측 및 파악이 가능할 것으로 사료된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ0149002021)", National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Climate Change Assessment Division, Republic of Korea.

References

1. Song MK, Kim MS, Kim MW, Lee KH, Bae MS (2020) 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>.
2. Choi BS, Song MJ (2017) Distributions and origins of PM10 in Jeollabuk-do from 2010 to 2015. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 251-264. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.251>.
3. Kim ST, Bae MA, Kim EH, Son KW, Kang YH, Kim YH, You SH, Kim BU, Kim HC (2021) Identifying the drivers of PM2.5 concentration changes between december 2019 and december 2020 in South Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 371-387. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.371>.
4. Bae MS, Jung CH, Kim YS, Kim KH (2013) A proposal for the upgrade of the current operating system of the Seoul's atmospheric monitoring network based on statistical analysis. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 447-458. <https://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.447>.
5. Kim ST, You SH, Kim EH, Kang YH, Bae MA, Son KW (2021) Municipality-level source apportionment of PM2.5 concentrations based on the CAPSS 2016. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 206-230. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.206>.
6. Kim EH, You SH, Bae MA, 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.2021.37.2.206>.
7. Lee KH, Kim SM, Kim KS, Hu CG (2020) Chemical mass composition of ambient aerosol over Jeju city. *Journal of Environmental Science International*, 29(5), 495-506. <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.5.495>.
8. Yu GH, Cho SY, Bae MS, Lee KH, Park SS (2015) Investigation of PM2.5 pollution episodes in Gwangju. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 269-286. <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.269>.
9. Son KW, Bae MA, You SH, Kim EH, Kang YH, Bae CH, Kim YH, Kim HC, Kim BU, Kim ST (2020) Meteorological and emission influences on PM2.5 concentration in South Korea during the seasonal management: A case of december 2019 to march 2020. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 442-463. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.442>.
10. Ainsworth, E.A. (2017) Understanding and improving global crop response to ozone pollution. *The Plant Journal*, 90(5), 886-897. DOI:10.1111/tpj.13298.