

논문

# 지상 및 항공 관측을 통한 자연환기식 양돈 밀집지역 암모니아 특성 분석

## Ground and Airborne Observations of Ammonia in a Naturally Ventilated Swine Farming Area

최준혁<sup>1)</sup>, 김연후<sup>1)</sup>, 서범근<sup>2)</sup>, 아비나쉬 샤스트리<sup>1)</sup>, 이미선<sup>3)</sup>, 김종호<sup>2),3)</sup>,  
홍세운<sup>4)</sup>, 김진식<sup>5)</sup>, 송형도<sup>5)</sup>, 유 철<sup>5)</sup>, 송미정<sup>1),6),\*</sup>

- <sup>1)</sup>전북대학교 공과대학 환경에너지융합학과, <sup>2)</sup>한서대학교 환경연구소,  
<sup>3)</sup>한서대학교 항공우주공학부 환경·토목·건축학과,  
<sup>4)</sup>전남대학교 농업생명과학대학 지역바이오시스템공학과,  
<sup>5)</sup>기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀,  
<sup>6)</sup>전북대학교 자연과학대학 지구환경과학과

접수일 2025년 9월 10일  
수정일 2025년 10월 9일  
채택일 2025년 10월 13일

Received 10 September 2025  
Revised 9 October 2025  
Accepted 13 October 2025

\*Corresponding author  
Tel: +82-(0)63-270-3394  
E-mail: mijung.song@jbnu.ac.kr

Joonhyeok Choi<sup>1)</sup>, Yeonhoo Kim<sup>1)</sup>, Beom-Keun Seo<sup>2)</sup>, Avinash Shastri<sup>1)</sup>, Misun Lee<sup>3)</sup>, Jongho Kim<sup>2),3)</sup>,  
Se-Woon Hong<sup>4)</sup>, Jinsik Kim<sup>5)</sup>, Hyung-Do Song<sup>5)</sup>, Chul Yu<sup>5)</sup>, Mijung Song<sup>1),6),\*</sup>

- <sup>1)</sup>Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea  
<sup>2)</sup>Environmental Research Center, Hanseo University, Seosan, Republic of Korea  
<sup>3)</sup>Department of Environmental, Civil, and Architectural Engineering, Hanseo University, Seosan, Republic of Korea  
<sup>4)</sup>Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea  
<sup>5)</sup>Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea  
<sup>6)</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea

**Abstract** Ammonia (NH<sub>3</sub>) is a key atmospheric pollutant emitted predominantly from agricultural activities, particularly swine farming, where it contributes to odor nuisance and secondary particulate matter formation. In this study, we conducted ground-based and airborne measurements of NH<sub>3</sub> from September 2023 to July 2024 in Gimje, Korea, a region characterized by densely clustered, naturally ventilated swine facilities. Average surface concentrations reached ~81.2 ppb, with consistently higher levels near farms compared to surrounding croplands. Distinct diurnal cycles were observed, with elevated concentrations at night and early morning and reduced levels during the afternoon. Relative humidity exhibited a strong positive correlation with NH<sub>3</sub> (R<sup>2</sup> > 0.9), while temperature effects were weak, suggesting that high moisture conditions enhance NH<sub>3</sub> volatilization in livestock environments. Airborne measurements revealed substantially lower NH<sub>3</sub> concentrations aloft (5~23 ppb) than at the surface, with seasonal differences linked to boundary layer dynamics. Source apportionment using conditional probability function analysis confirmed that local swine operations dominated NH<sub>3</sub> emissions. These findings highlight the persistence of high NH<sub>3</sub> in swine-farming regions, its sensitivity to meteorological factors, and the need for targeted mitigation strategies to reduce odor and secondary aerosol formation.

**Key words:** NH<sub>3</sub> concentration, Livestock emissions, Swine farms, Real-time monitoring, Airborne measurement, Gimje

### 1. 서론

염기성 가스상 물질인 암모니아(NH<sub>3</sub>)는 가축분뇨, 토양, 비료 시비 등 농업활동과 자동차 및 산업 공정

과 같은 인위적 활동에 의해 배출되어 인체, 생태계 전반에 상당한 영향을 미치는 핵심 대기오염물질로 알려져 있다(Sutton *et al.*, 2013). 국내에서 NH<sub>3</sub>는 국가 지정 악취물질로 분류되며, 인근 주민에게 상당한

악취를 유발하여 이와 관련된 민원이 매년 증가하는 실정이다(KOSIS, 2024). 특히, NH<sub>3</sub>는 인체에 장기간 노출될 경우 다양한 호흡기 및 심혈관 질환을 일으키는 독성물질로 작용할 수 있다(Kumar *et al.*, 2019). 또한, 대기 중에서 질산(HNO<sub>3</sub>) 및 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 등의 산성가스와 반응을 통해 질산암모늄(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), 황산암모늄((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 같은 이차 무기 미세먼지를 형성하여 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상에 기여할 수 있는 것으로 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 2016).

전 세계적으로 NH<sub>3</sub>의 배출량은 1970년대 이후 지속적으로 증가하였으며, 전체 배출량 중 70%가 농업 활동에서 발생하는 것으로 보고되었다(McDuffie *et al.*, 2020). CAPSS (clean air policy support system)에서 산정한 2022년 국가 대기오염 배출량 자료에 의하면, 국내 NH<sub>3</sub> 배출량 중 약 80% 이상(202,443 ton/year)이 농업 부문에서 발생한 것으로 나타났다(NAIR, 2024). 그중 가축 분뇨 관리가 약 92% (186,502 ton/year)를 차지하는 것으로 나타났으며, 특히 돼지에서 발생하는 NH<sub>3</sub>가 약 42% (78,966 ton/year)로 소, 닭 등 다른 축종에 비해 높은 비중을 보이는 것으로 나타났다.

대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 지역적 특성 및 배출원에 따라 상이하게 분포하는 경향을 보이며, 특히 축산지역에서 고농도가 보고되어왔다. 2020년 3월~2021년 2월 충청남도 보령과 홍성의 양돈 밀집지역에서 관측된 평균 NH<sub>3</sub>는 각각 85.3 ppb, 62.9 ppb로 보고되었다(Jang *et al.*, 2021). 또한, 2020년 6~12월 전라북도 정읍시 종합 축산단지에서 패시브 샘플러(passive sampler)를 통해 측정된 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 37.1~161.1 ppb로 나타났다(Park *et al.*, 2021b). 2013년 5~9월 중국 Gucheng 축산지역에서 실시간 NH<sub>3</sub> 평균 농도는 36.2 ppb로 관측되었으며(Meng *et al.*, 2018), 2009년 1월~2019년 12월 이탈리아 Bertanico 축산지역에서 약 10년간 장기측정한 NH<sub>3</sub> 평균 농도는 약 41 ppb로 나타났다(Lonati and Cernuschi, 2020). Li *et al.* (2017)은 2010년 5월~2015년 9월 미국 Colorado 축산지역에서 평균 61.9 ppb의 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도를 관측하였다. 반면, 타 배출원에서는 상대적으로 낮은 NH<sub>3</sub> 농

도가 보고되었다. 2020년 6~12월 전라북도 전주시 도심지역에서 평균 13.1 ppb의 NH<sub>3</sub> 농도가 관측되었으며(Park *et al.*, 2021b), 2014년 5월~2015년 6월 중국 Shanghai 도심지역에서 7.8 ppb로 보고된 바 있다(Chang *et al.*, 2019). 2010년 11월 스페인 Huelva 산업지역에서는 11.6 ppb의 NH<sub>3</sub> 농도가 나타났다(Reche *et al.*, 2015). 국내 축산지역에서 배출되는 고농도 NH<sub>3</sub>에 의한 악취에 대한 민원은 매년 증가하고 있으며(KOSIS, 2024), NH<sub>3</sub>의 입자상 전환으로 인한 고농도 PM<sub>2.5</sub> 생성이 지속적으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2023a). 이처럼 축산 배출원에서 NH<sub>3</sub> 관리에 대한 중요성은 점차 증가하고 있으나, 이를 위한 장기간 측정 자료는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 2023년부터 2024년까지 계절별로 자연환기식 양돈 축산시설이 밀집된 전북특별자치도(이하 전라북도) 김제시 용지면에서 지상 및 상공의 NH<sub>3</sub> 실시간 관측을 수행하였다. 수집된 실시간 데이터를 활용하여 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도의 시간별 및 계절별 변동성을 분석하고, 선행 연구에서 보고된 자료를 바탕으로 배출원별 NH<sub>3</sub> 농도 분포를 조사하여 특성을 분석하고자 하였다.

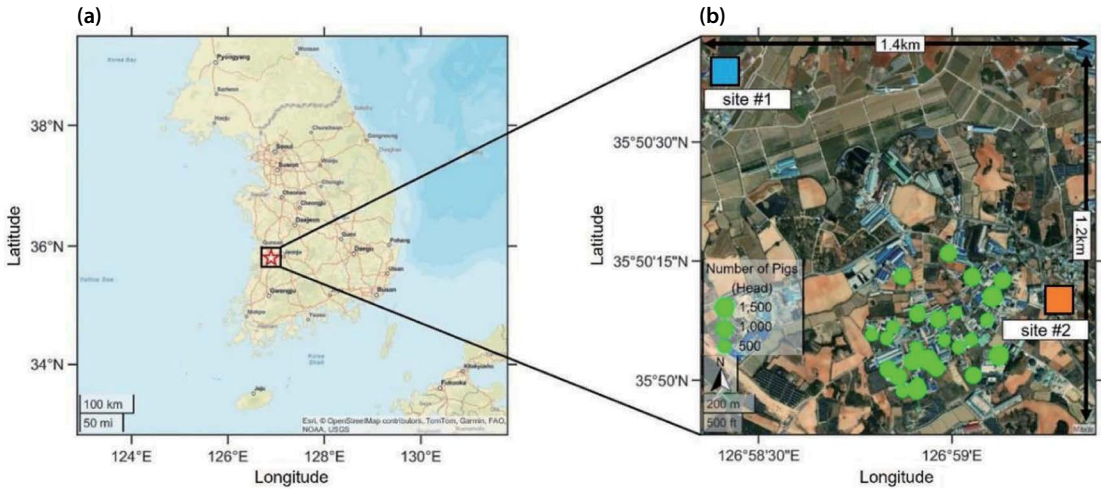
## 2. 연구 방법

### 2.1 측정 장소

실시간 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도 및 기상자료는 2023년 9월 22일부터 2024년 7월 4일까지 전라북도 김제시 용지면 내 자연환기식 양돈농가 밀집지역에서 계절별(가을: 2023년 9월 22일~10월 10일, 겨울: 2023년 12

**Table 1.** The measurement period of seasonal ground-level NH<sub>3</sub> concentration in naturally ventilated swine farming area in Gimje.

Season	Measurement period
Autumn	September 22, 2023~October 10, 2023
Winter	December 5, 2023~December 28, 2023
Spring	March 29, 2024~May 4, 2024
Summer	Jun 5, 2024~July 6, 2024



**Fig. 1.** Sampling location of the livestock area in Gimje, South Korea. The light green dots indicate the number of sites. The light blue and orange squares represent the locations of site #1 and site #2, respectively.

월 5일~28일, 봄: 2024년 3월 29일~5월 4일, 여름: 2024년 6월 5일~7월 4일)로 측정되었다(표 1). 김제시는 약 88,000명의 인구가 거주하는 국내 대표적인 농업 도시로(KOSIS, 2024), 연구가 수행된 용지면은 전라북도 전체 돼지 사육 두수의 약 8.1% (121,022마리)를 차지하는 주요 양돈 사육 지역이다(EPIS, 2024)(그림 1). 김제시 용지면은 표준화된 현대식 시설보다는 낙후된 재래식의 소형 양돈농가로 구성되어 있다. 해당 농가들은 주로 원치커튼을 활용한 자연환기 방식을 채택하고 있다. 이로 인해 인근 도심 지역인 전주에서 악취 민원의 주요 원인으로 지목되고 있다. 대상지(1.4 km × 1.2 km, 두 측정 지점 기준) 내 사육 두수는 최소 23,901마리에서 최대 29,728마리로 집계되었다. 해당 지역의 사육 밀도(14,227~17,695마리/km<sup>2</sup>)는 김제시 전체(약 540 km<sup>2</sup>, 260,000마리)의 평균 밀도인 약 482마리/km<sup>2</sup>보다 현저히 높은 수준이다(EPIS, 2024).

대상지 내 주변 환경에 대한 NH<sub>3</sub> 배출 특성을 파악하기 위하여, 관측 지점을 양돈농가 site #1 (35.8434°N, 126.9732°E)과 site #2 (35.8360°N, 126.9887°E)로 구분하고 각 측정 지점에서 실시간 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하였다. 본 양돈농가 site #1 지점 인근은 주로 농경지로 구

성되어 있으며, 측정 기간 동안 재배 및 비료 시비 등 농업활동이 활발하게 이루어졌다. 또한, 해당 지점의 반경 500 m 이내에는 양돈 관련 배출원이 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 반면, 양돈농가 site #2 지점의 경우, 측정소를 기준으로 서쪽에서 북서쪽 방향에 자연환기식 양돈농가들이 다수 밀집해 있다(그림 1b).

## 2.2 지상 측정

### 2.2.1 지상 실시간 암모니아 농도 측정

대기 중 실시간 NH<sub>3</sub> 농도는 양돈농가 site #1에서 G2103 (Picarro, USA) 기기를 이용하여 CRDS (cavity ring down spectroscopy) 방식으로, 양돈농가 site #2 지점에서는 EAA-911 (Los Gatos Research, USA) 기기를 통해 OA-ICOS (off-axis integrated cavity output spectroscopy) 방식으로 측정되었다. 각 NH<sub>3</sub> 측정 기기의 흡입구(inlet)는 직경 4 mm의 Teflon (PFA: poly fluoroalkoxy) 재질을 채택하였고, NH<sub>3</sub> 흡착을 방지하기 위해 길이는 1.5 m 이하로 최소화하였다. 이때 NH<sub>3</sub> 농도는 1초 간격으로 수집되었으며, 이상치 및 기기 점검 시간을 제거하여 1시간 평균값을 분석하였다(Kim *et al.*, 2023a; Park *et al.*, 2020).

본 연구에서 사용된 측정 기기의 최소측정농도

(MDL, minimum detection limit)와 정밀도( $1\sigma$ ,  $1s$  조건)는 각각 CRDS가 0.03 ppb 및 0.19 ppb, OA-ICOS가 0.3 ppb 및 0.9 ppb로 알려져 있다(Twigg *et al.*, 2022). 또한 본 실시간 측정기는 특정 파장의 흡광 특성을 이용하여  $\text{NH}_3$  농도를 정량하기 때문에, 추가적인 외부 교정이 필수적이지 않은 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2023a; Park *et al.*, 2021a). 그러나 분석 결과의 정확도와 신뢰성을 향상시키기 위하여 본 연구에서는 검량 및 교정 작업을 수행하였다. 계절별 집중 측정일 전과 종료 후 표준  $\text{NH}_3$  가스(정확도  $\pm 2\%$ , 10.2 ppm, Air Korea, South Korea)와 초고순도 질소(99.999%, Air Korea, South Korea)를 혼합하여 희석가스를 제조하고, 이를 이용하여 기기의 검량 및 교정을 실시하였다. 대상 지역이  $\text{NH}_3$  배출량이 높은 축산지역임을 고려하여,  $\text{NH}_3$  주입 농도는 250 ppb부터 시작하여 100 ppb, 60 ppb, 20 ppb 순으로 단계적으로 감소시켜 주입하였다. 검량 결과, 각 측정 장비의 주입 농도와 실제 측정 농도 간의 오차는 모두 2% 이내로 나타났으며, 결정계수( $R^2$ )는 0.999 이상으로 분석되었다. 추가로, 집중 측정 종료 후 실시간  $\text{NH}_3$  장비 간의 측정 오차를 검증하기 위해, 실험실에서 T자형 피팅(T-fitting)을 이용하여 동일한 흡입구를 통한 외기 동시 측정을 수행하였다. 그 결과, 두 장비 간  $\text{NH}_3$  농도 차이가 약 10% 이내로 나타났으며, 이를 통해 본 연구에서 수집된 데이터의 신뢰성을 확인하였다.

### 2.2.2 측정 지점 지상 기상자료

양돈 밀집지역 내 대기 중  $\text{NH}_3$  농도와 기상 환경 간의 상관관계를 분석하기 위해, 자동 기상 시스템(FWS500, Front-tech, China)을 이용하여 풍속, 풍향, 상대습도 및 기온을 1분 간격으로 수집하였으며, 이를 1시간 평균 값으로 변환하여 연구에 활용하였다. 측정 시 주변 장애물에 의한 간섭을 최소화하기 위해, 기상 센서를 컨테이너 지붕 위에 별도의 지지대를 이용하여 지상으로부터 3 m 이상의 높이에 설치하였다. 또한, 기상대는 겨울과 가을 기간에는 양돈농가 site #2 지점에, 봄과 여름 기간에는 양돈농가 site #1 지점에

설치하여 자료를 수집하였다.

### 2.3 암모니아 기원 추적

양돈 밀집지역 내  $\text{NH}_3$ 의 국지적인 기원을 분석하기 위해 기상대로 수집된 풍속과 풍향 자료를 활용하여 CPF 분석을 진행하였다. CPF는 아래 식 1을 통해 계산하였다(Pekney *et al.*, 2006).

$$CPF = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (1)$$

여기에서  $n_{\Delta\theta}$ 는 전체 측정 기간 동안 특정 방향( $\Delta\theta$ )에서 불어오는 바람의 총 횟수를,  $m_{\Delta\theta}$ 는 대기 중  $\text{NH}_3$  농도가 설정한 기준을 초과할 때 해당 방향에서 발생한 바람의 횟수를 나타낸다(Pekney *et al.*, 2006). 계산된 CPF 값이 1.0에 가까울수록, 해당 풍향과 풍속에서 고농도  $\text{NH}_3$ 가 배출될 가능성이 높음을 의미한다.

### 2.4 항공 측정

#### 2.4.1 대기질 관측 항공기 및 기상자료

양돈 밀집지역 상공에서의  $\text{NH}_3$  농도를 관측하기 위해 대기질 관측 항공기인 Beechcraft King Air-C90GT (C90GT, Beechcraft, USA)를 활용하였다. 해당 항공기는 가스상 및 입자상 물질 시료채취구, 전원공급장치, 기상측정장비(AIMMS-30, Aventech Research Inc., Canada)를 탑재하고 있으며, 항공관측 시 최대 운용 고도는 3 km, 항속거리는 900 km, 비행 가능한 시간은 약 3시간 이내이다.  $\text{NH}_3$  측정에는 지상(양돈농가 site #2)에서 운용하는 것과 동일한 EAA-911 장비를 활용하였다. 측정 기기의 경우, 항공기 내 탑재를 위해 알루미늄 재질의 H-rack(Hanse rack, Seo *et al.*, 2019)에 고정한 후, 항공기 바닥 레일에 T자형 볼트 및 너트를 이용하여 고정하였다. 시료 채취구에서 측정 기기까지는 열선 내장 테플론 관을 사용하여 가스를 유입하였으며, 측정 후 시료는 배출관을 통해 항공기 외부로 방출하였다. 장비 교정은 안정화 후 gas calibrator를 이용하여 zero air 및 10~40 ppb 범위의  $\text{NH}_3$  표준 기체를 사용하여 검량선을 작성하였다. 또한, 대

기 안정도 파악을 위한 행성 경계층 고도 (PBLH: planet boundary layer height) 데이터는 기상청에서 수치예보자료 (LDAPS: Local Data Assimilation and Prediction System)를 활용하여 산출한 지역별 (백령도, 안면도, 군산, 흑산도, 군산 등) PBLH에 대한 시계열 그래프 중에서 본 연구의 측정 지역과 가장 가까운 군산지점의 그래프를 이용하여 간접적으로 연직 확산 특성을 분석하였다(KMA, 2024).

### 2.4.2 실시간 상공 암모니아 농도 측정

본 연구에서 항공관측은 전라북도 김제시 용지면의 양돈 밀집지역 상공에서 수행되었으며, 비행경로는 그림 2에 정리하였다. 항공관측의 비행경로는 한서대학교 태안비행장에서 이륙하여 고도 3,600 ft에서 측정 지역까지 이동 후 고도 3,600 ft부터 1,500 ft (평지 상공에서 가능한 경우에는 1,300 ft까지 비행)까지 하향하며 나선형 비행을 수행하고 비행 구역(그림 2 파란색 영역) 내 지형(해발고도)을 고려하여 고도 1,500 ft로 고정된 지그재그형 비행을 하는 경로로 구성되었다. 나선형 비행의 경우, NH<sub>3</sub>의 확산 고도와 범위를

사전에 정확히 예측하기 어려운 점을 반영하여 작은 반경과 큰 반경으로 구분하여 수행하였다.

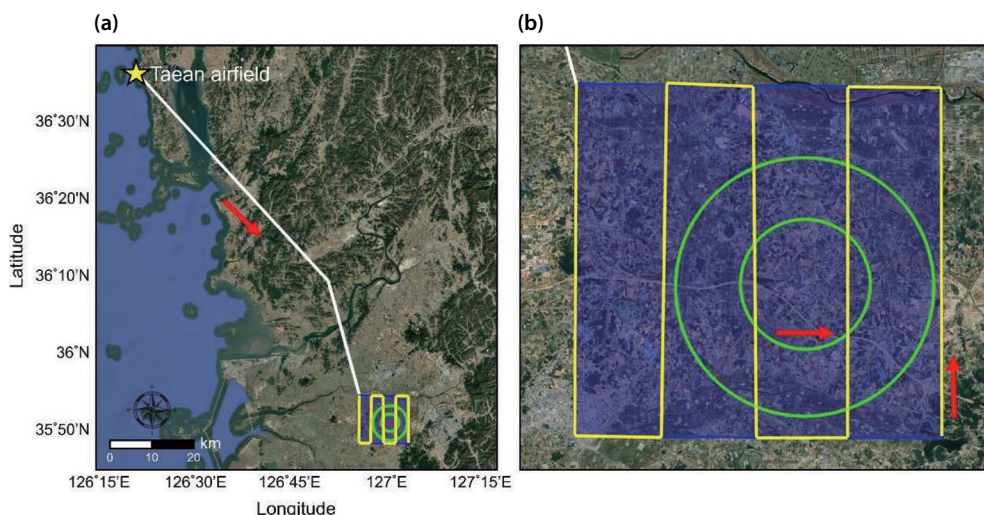
항공관측일 선정은 양돈 밀집지역에서 배출된 NH<sub>3</sub>가 수평 및 연직 확산이 원활하게 이루어질 수 있는 구름이 적은 맑은 날씨 조건에서 실시하였다. 계절별 NH<sub>3</sub> 항공관측일은 가을(1회 비행, 2023/10/6 오후), 겨울(2회 비행, 2023/12/7 오전 및 오후), 봄(2회 비행, 2024/5/2 오후, 2024/5/3 오후) 및 여름(1회 비행, 2024/6/26 오후)이며, 각 항공관측별 수행된 비행시간은 약 3시간이다.

## 3. 결과 및 고찰

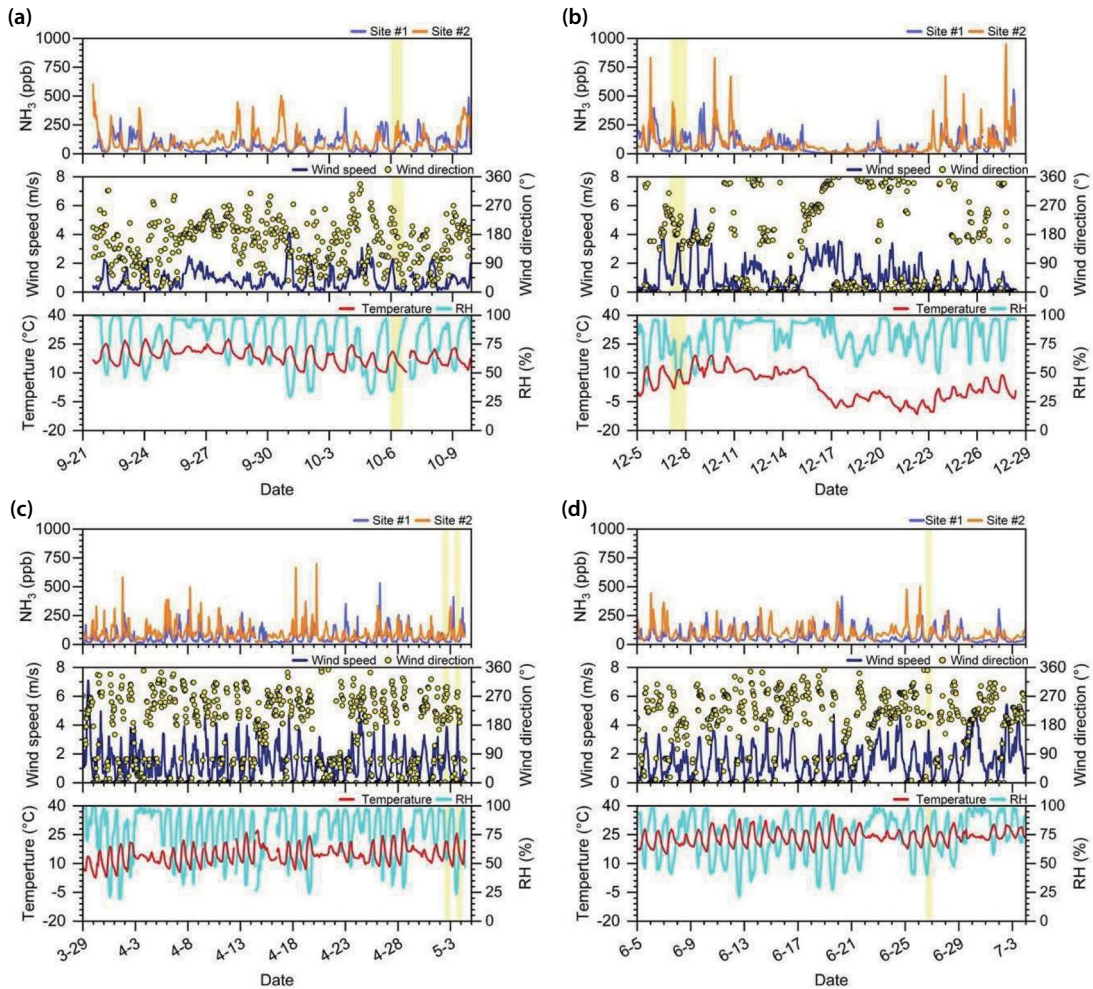
### 3.1 양돈 밀집지역 지상 암모니아 특성 분석

#### 3.1.1 지상 암모니아 농도 분석

2023년 9월 22일~2024년 7월 4일 동안 김제시 용지면의 양돈 밀집지역에서 관측한 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도와 풍속, 풍향, 기온 및 상대습도의 1시간 단위 시계열 변화를 그림 3에 나타내었다. 양돈농가 site #1 지점에



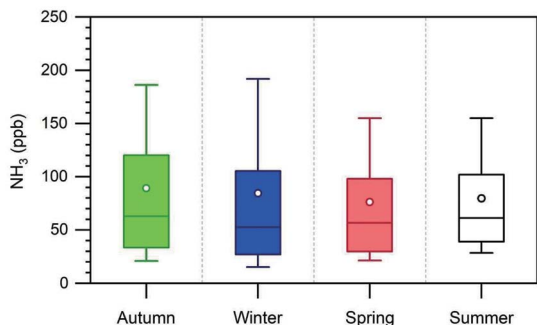
**Fig. 2.** Flight paths of airborne measurement conducted over the livestock area in Gimje (The red arrow indicates the flight direction of the C90GT aircraft): (a) entire flight paths (white, green and yellow line) from the Taeon airfield to the livestock area; (b) enlarged view of observation area (blue area) for spiral flight path (green line) and zigzag flight path (yellow line). The spiral flight path for each altitude (from 1,500~3,600 ft) was flown in the same way as the green circle.



**Fig. 3.** Seasonal time series of hourly averaged atmospheric  $\text{NH}_3$  concentrations and meteorological parameters (wind speed, wind direction, temperature, and relative humidity) measured in the livestock area from September 22, 2023, to July 4, 2024. Data are shown for (a) Autumn, (b) Winter, (c) Spring, and (d) Summer. The yellow shading indicates the period during which flight measurements were conducted.

서 평균  $\text{NH}_3$  농도는  $69.0 \pm 66.7$  ppb로 나타났다. 계절별 농도는 겨울 ( $80.3 \pm 83.1$  ppb) > 가을 ( $77.9 \pm 69.2$  ppb) > 여름 ( $65.2 \pm 55.1$  ppb) > 봄 ( $60.6 \pm 60.9$  ppb) 순으로 확인되었다. 양돈농가 site #2 지점에서는 평균  $\text{NH}_3$ 가  $93.3 \pm 80.8$  ppb였다. 계절별 농도는 가을 ( $101.3 \pm 89.9$  ppb) > 여름 ( $93.8 \pm 60.5$  ppb) > 봄 ( $92.0 \pm 69.7$  ppb) > 겨울 ( $88.5 \pm 107.4$  ppb) 순이었으나, 계절별 농도는 약 15% 내에서 변동되었다. 전체기간 동안

평균  $\text{NH}_3$  농도는 양돈농가 site #2 지점 ( $93.3 \pm 80.8$  ppb)에서 site #1 ( $69.0 \pm 66.7$  ppb)보다 높은 수준으로 관측되었다. 이는 양돈농가 site #1 지점의 측정소 인근에는 농경지가 밀집되어 있는 반면, 양돈농가 site #2 지점의 경우, 측정소 인근 북서쪽에 자연환기식 양돈시설이 다수 밀집하여  $\text{NH}_3$  배출이 상대적으로 높았기 때문으로 판단된다(그림 1). 축산지역에서 패시브샘플러를 통해  $\text{NH}_3$ 의 공간적 분포를 분석한 Park

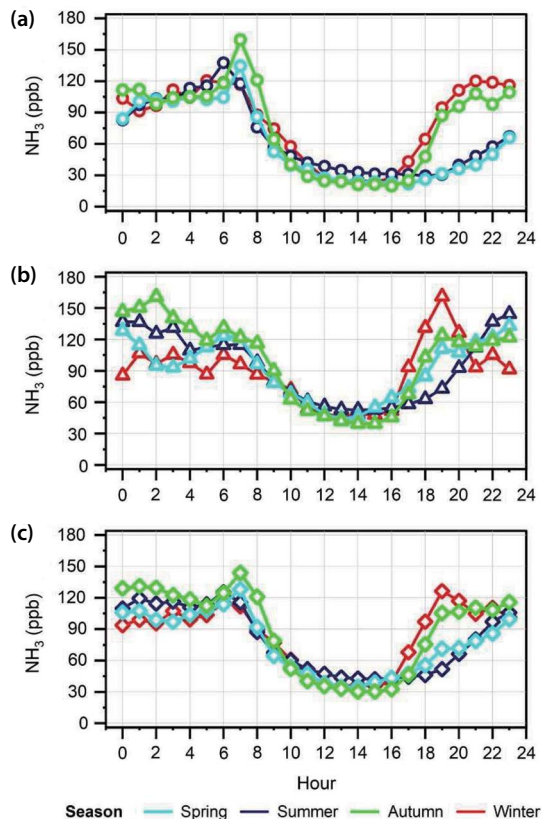


**Fig. 4.** Seasonal variations of atmospheric NH<sub>3</sub> in livestock area. NH<sub>3</sub> data in figures were used as the average of site #1 and site #2.

*et al.* (2021b)과 Theobald *et al.* (2015)의 연구에서도 측정 농가로부터 500 m 이격될 시 대기 중 희석 효과로 인해 NH<sub>3</sub> 농도가 현저히 감소한다고 보고한 바 있다.

두 측정 지점을 평균하였을 때, 계절별 암모니아 농도는 가을(89.4 ppb) > 겨울(84.5 ppb) > 여름(79.6 ppb) > 봄(76.3 ppb)이었으며, 계절별 농도가 유사하였다(그림 4). 일반적으로 NH<sub>3</sub>는 온도에 의존적이며, 이에 따라 도심과 산업지역, 농경지 등 다양한 배출원에서 고온이 유지되는 여름철에 고농도 현상이 보고되어왔다(Park *et al.*, 2023; Oh *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2015). 그러나 본 연구에서 자연환기식 양돈 밀집지역의 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 계절적으로 변동이 크지 않은 것이 특징적이었다. 이러한 양돈지역 NH<sub>3</sub> 배출 특성은 흥성의 양돈 밀집지역에서 수행한 결과와 유사하였다(Jang *et al.*, 2021). 해당 선행 연구에서는 평균 NH<sub>3</sub> 농도가 약 62.9 ppb로 관측되었으며, 본 김제 양돈 밀집지역과 마찬가지로 계절적 변동은 미미하였고, 사계절 동안 항상 고농도 NH<sub>3</sub>가 유지되는 것으로 나타났다.

측정 기간 동안 평균 기온은 15.2 ± 9.0°C로 관측되었으며, -11.6~35.5°C의 범위로 분포했다. 평균 상대습도의 경우, 77.7 ± 19.1%였으며, 범위는 19.2~99.4%로 변동하였다. 전 계절에 걸쳐 상대습도가 전반적으로 높게 유지되었으며, 이는 인근 도심 지역인 전주시



**Fig. 5.** Seasonal diurnal variations in NH<sub>3</sub> concentrations at (a) site #1 and (b) site #2, and (c) whole average of sites #1 and #2.

의 관측 결과(평균 상대습도: 67.6%)에 비해 높은 수준으로(Park *et al.*, 2021a), 측정 기간 동안 대상지에 상대적으로 습한 환경이 형성되었다. 또한 평균 풍속은 1.3 m/s로 낮았다(그림 3).

측정 기간 동안 양돈 밀집지역 내 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도의 일변화 경향성을 분석하였다(그림 5). 두 측정 지점에서의 NH<sub>3</sub> 농도는 사계절 모두 뚜렷하고 공통된 일변화 패턴을 보였다. 그림 5a에 제시된 바와 같이 양돈농가 site #1 지점에서는 오전 6~7시경 NH<sub>3</sub> 농도가 약 140~160 ppb로 분포하여 하루 중 최고치를 기록하였으며, 오후 3시경 약 30 ppb 이하까지 감소하는 것으로 파악되었다. 양돈농가 site #2의 NH<sub>3</sub> 일변화는 오후 8시~새벽 2시경 NH<sub>3</sub>의 농도가 약 150~

170 ppb 이상 상승하여 하루 중 최고치를 기록하였다 (그림 5b). 이후 일출과 함께 NH<sub>3</sub>의 농도가 점차 감소하여 오후 3~4시경 약 40 ppb까지 하락하는 경향이 확인되었다. 전반적으로 양돈 밀집지역의 NH<sub>3</sub> 일변화 경향성은 야간과 새벽에 증가하고, 오후에 감소하는 경향성이 확인되었으며, 두 지점에서 모두 유사한 농도 패턴이 나타났다.

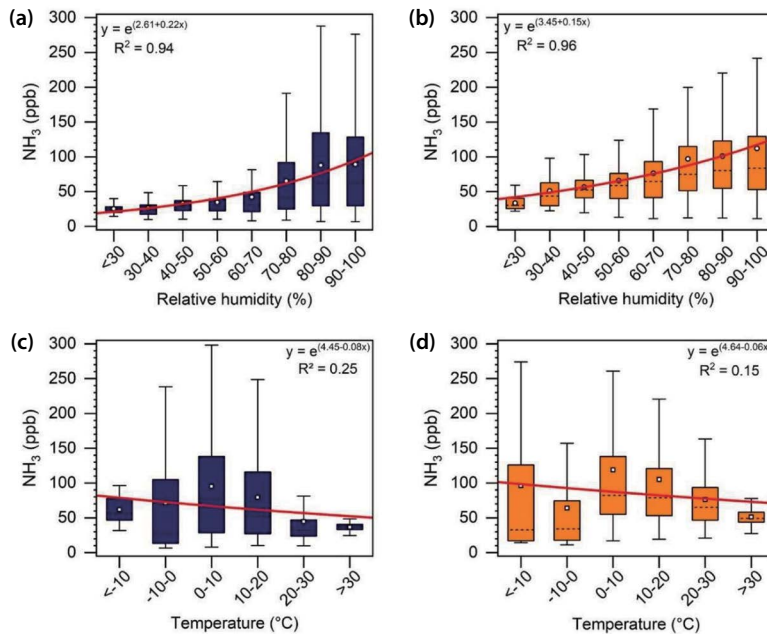
그림 5c에는 Site #1과 Site #2의 농도를 평균화하여 NH<sub>3</sub> 일변화 경향성을 제시하였다. 대기 중 NH<sub>3</sub>의 계절별 최고 농도는 가을철 143.7 ppb (오전 7시), 겨울철 126.2 ppb (오후 7시), 봄철 127.9 ppb 및 여름철 125.2 ppb (오전 6시)로 분포하였다. 이러한 야간 및 오전 중 NH<sub>3</sub>의 고농도 현상은 농축산지역에서 주로 관측되는 특징으로, 주간에 농도가 급격히 저하되는 것은 PBLH에 따른 대기 혼합 특성과 밀접한 관련이 있다 (Jang *et al.*, 2021). 주간에는 PBLH 상승으로 인해 대기의 수직 혼합이 활발히 이루어져 NH<sub>3</sub> 농도가 감소하는 반면, 야간에는 경계층 고도가 하강함에 따라 자연환기 방식의 양돈농가와 같은 고정 배출원에

서 고농도의 NH<sub>3</sub>가 지속적으로 배출된다. 본 연구에서 관측된 NH<sub>3</sub> 농도의 일변화는 2020년 3월~2021년 2월 보령과 홍성의 양돈 밀집지역 (Jang *et al.*, 2021) 및 2013년 6~9월 중국 Gucheng의 축산지역에서 보고된 패턴 (Meng *et al.*, 2018)과 유사하게 나타났다. 반면, 2019년 5월~2020년 4월 전주 (Park *et al.*, 2021a) 및 2013년 7월~2014년 9월 중국 Shanghai의 도심지역 (Wang *et al.*, 2015)에서 오후 시간대에 고농도 NH<sub>3</sub>가 보고되었던 결과와는 대조되는 양상을 보였다.

### 3.1.2 기상인자가 암모니아에 미치는 영향

다양한 선행 문헌에 따르면, 기상 요소는 NH<sub>3</sub> 농도에 중요한 영향을 미치는 인자 중 하나로 보고되어 왔다 (Park *et al.*, 2021b; Wang *et al.*, 2015; Reche *et al.*, 2012). 본 연구에서는 양돈 밀집지역에서 기상환경 (상대습도 및 기온)이 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도에 미치는 영향을 파악하고자, 그림 6을 통해 두 기상 요소와 실시간 NH<sub>3</sub> 측정 자료 간의 상관분석을 수행하였다.

그림 6a 및 6b는 각각 양돈농가 site #1과 site #2에



**Fig. 6.** Correlation between NH<sub>3</sub> concentration and meteorological conditions: (a), (b) relative humidity, and (c), (d) temperature. Navy and orange colors represent results from site #1 and site #2, respectively.

서 관측된  $\text{NH}_3$  농도와 상대습도 간의 관계를 나타낸다. 상대습도가 높은 환경에서는 입자상 전환이 촉진되어 가스상  $\text{NH}_3$  농도가 감소하는 것으로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2015). 그러나, 양돈 밀집지역에서는 대기 중 상대습도가 증가함에 따라  $\text{NH}_3$  농도가 유의미하게 상승하는 경향을 보였으며, 두 지점에서의  $R^2$ 가 모두 0.9 이상으로 높은 상관관계가 나타났다. 이는 자연환기식 축산밀집지역 내에서 습한 환경이 형성될수록 인근 대기 중  $\text{NH}_3$  농도 상승에 영향을 미칠 수 있는 가능성을 제시하였다. Cabrera *et al.* (2010)은 농축산업에서 사용되는 요소(urease)가 높은 상대습도 조건에서 토양 내 용해작용을 촉진하고, 이로 인해  $\text{NH}_3$ 의 대기 중 휘발이 증가할 수 있음을 보고한 바 있다. 또한, He *et al.* (2020)은 중국 Xinghe 농촌지역에서 상대습도와  $\text{NH}_3$  농도 간 상관성을 분석한 결과, 야간 동안 토양 및 작물에 축적된 수분이 아침에 급격히 증발하면서  $\text{NH}_3$  농도가 증가할 수 있음을 제시하였다. 이는 축산지역에서 상대습도의 증가가  $\text{NH}_3$  농도 상승을 유발할 수 있는 가능성을 뒷받침한다.

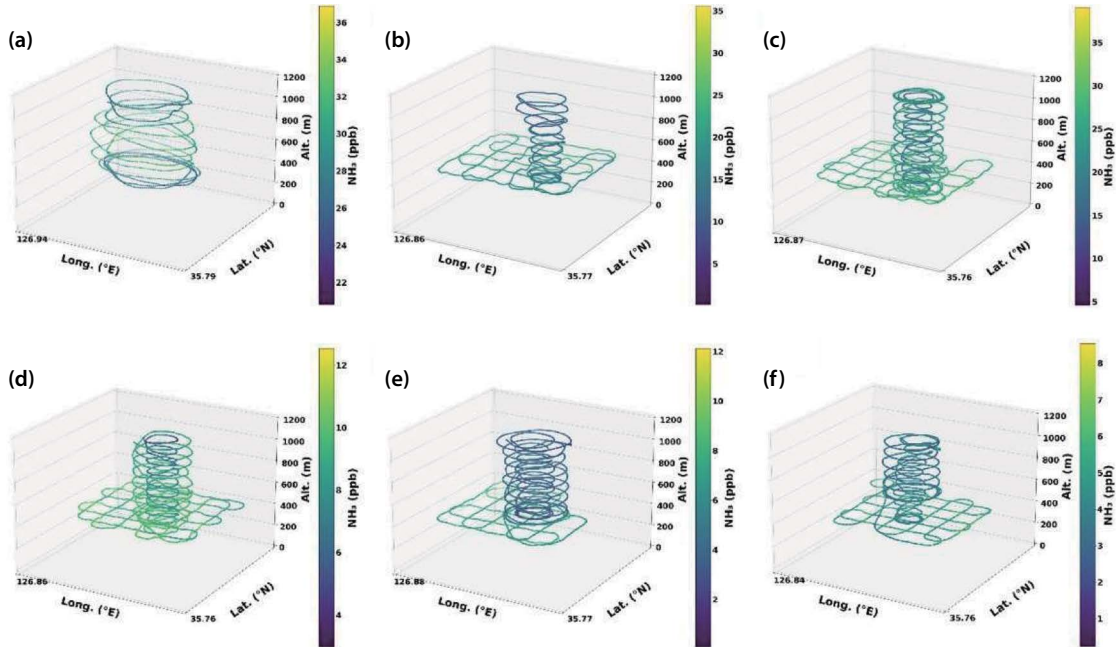
일반적으로 암모니아는 온도에 민감하여, 기온이 상승하면 암모니아 증기압이 증가함에 따라 대기 중 농도가 높아지는 것으로 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 2016). 예를 들어 Park *et al.* (2021a)은 전주시 도심지역에서  $\text{NH}_3$  농도와 기온 간 높은 양의 상관성을 보고하였다. 그러나 본 연구에서 조사한 양돈 밀집지역에서는 상시적으로 고농도의 암모니아가 배출되는 환경의 영향으로 인해, 일반적인 암모니아와 기온과의 양의 상관관계의 경향과는 다른 결과가 도출되었다. 그림 6c 및 6d의 상관성 분석 결과, 양돈 밀집지역의 기온과 대기 중  $\text{NH}_3$  농도 간  $R^2$ 는 낮게 나타나 통계적으로 유의미한 상관성을 확인하기 어려웠다. 이는 연중 지속적으로 높은 농도의 암모니아가 배출되는 자연환기식 양돈 사육시설 특성상, 기온의 변화보다는 환기 방식, 분뇨 관리 상태 등 내부 환경 요인이 암모니아 농도에 더 큰 영향을 미쳤을 가능성이 높기 때문이다. 이러한 경향은 2020~2021년 김제시 축산지역의 양돈농가 밀집지역을 대상으로 한 계절별

$\text{NH}_3$  농도 특성을 분석한 Kim *et al.* (2023a)의 결과와도 일치한다. 일반적인 대기(도심) 환경과 달리 축산 시설 내부에서 형성되는 고농도 암모니아는 기온과 농도 간 상관성이 뚜렷하게 나타나지 않을 수 있음을 시사한다.

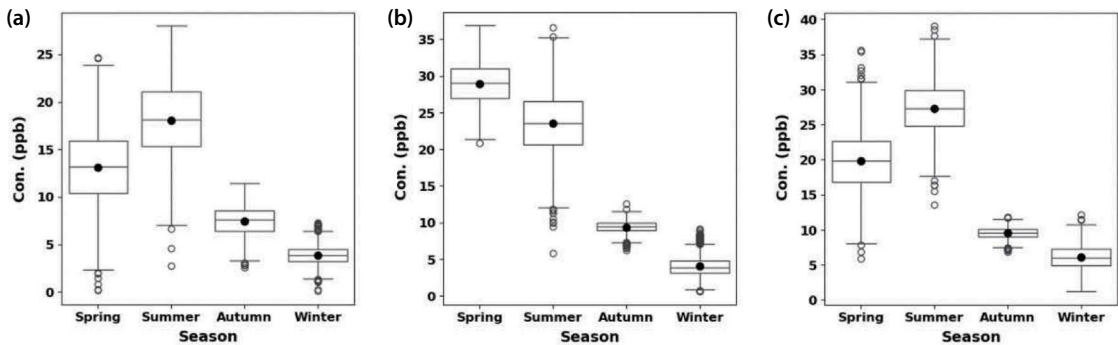
### 3.2 양돈 밀집지역 상공 암모니아 분포 특성

양돈 밀집지역 상공에서의 항공관측은 가을 1회(2023년 10월 6일 오후), 겨울 2회(2023년 12월 7일 오전과 오후), 봄 2회(2024년 5월 2일 오후와 2024년 5월 3일 오후), 여름 1회(2024년 6월 26일 오후)로 계절별로 수행하였다. 그림 7은 양돈 밀집지역 상공에서 각 항공관측별 실제 비행한 경로와 측정된  $\text{NH}_3$  농도를 3차원으로 도식화한 결과이다. 비행 시 나선형 비행과 지그재그 비행으로 고도별  $\text{NH}_3$  농도변화가 나타났으며, 전반적으로 측정 고도가 낮아질수록 지면에 가까워져 농도는 상승되는 경향성을 나타내었다.

그림 8은 항공관측을 통해 수집된 계절별 양돈 밀집지역 상공의  $\text{NH}_3$  농도 추이를 보여준다. 상공에서 측정된 나선형 및 지그재그 비행 결과를 평균하였을 때,  $\text{NH}_3$  농도는 가을 8.8 ppb, 겨울 5.2 ppb, 봄 20.4 ppb, 여름 23.2 ppb로 측정되었다. 상공 측정 결과의 경우, 지상 측정 결과 대비 약 71~94% 낮은 수준으로 나타났으며,  $\text{NH}_3$  농도의 계절별 경향성이 상이한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 여름철에 고온에 따른 증가된 PBLH로 인해 지상에서 배출된  $\text{NH}_3$ 가 상공까지 원활하게 확산된 반면, 겨울철에는 저온으로 인해 PBLH가 낮게 형성되어  $\text{NH}_3$ 가 항공관측의 최저고도까지 충분히 상승하지 못했기 때문으로 추측된다. 특히, 겨울철 항공관측 시기에 PBLH가 1,000 m (정오)에서 200 m (오후 4시)로 급격히 축소되고, 대기가 안정도 강해져 연직 확산이 제한되었을 가능성이 높다. 반면, 여름철에는 상공 400 m 이상까지 PBLH이 형성되어  $\text{NH}_3$ 가 항공관측을 수행한 저고도까지 효과적으로 확산되었을 것으로 추정된다. 향후 고도별 상공  $\text{NH}_3$  농도의 면밀한 분석을 위해서



**Fig. 7.** The real flight paths of airborne measurement and observed  $\text{NH}_3$  concentrations over the Livestock region: (a) May 2, PM, 2024 (spring), (b) May 3, PM, 2024 (spring), (c) June 26, PM, 2024 (summer), (d) October 6, PM, 2023 (autumn), (e) December 7, AM, 2023 (winter), and (f) December 07, PM, 2023 (winter).



**Fig. 8.** Seasonal comparison of airborne  $\text{NH}_3$  observations: (a) Spiral flight #1 (small radius), (b) Spiral flight #2 (large radius), and (c) Zigzag flight.

는 라디오존데 등 고층 관측 장비를 활용하여 정확한 PBLH 및 대기 안정도 자료를 확보할 필요가 있다.

미국 San Joaquin Valley 농업 지역에서 수행된 입체 관측 선행 연구에 따르면,  $\text{NH}_3$ 는 지상 측정에서 약 56~58 ppb 수준으로 나타났지만, 항공관측에서는 0.6 ppb 이하로 관측되어 지상에 비해 상공의 농도가

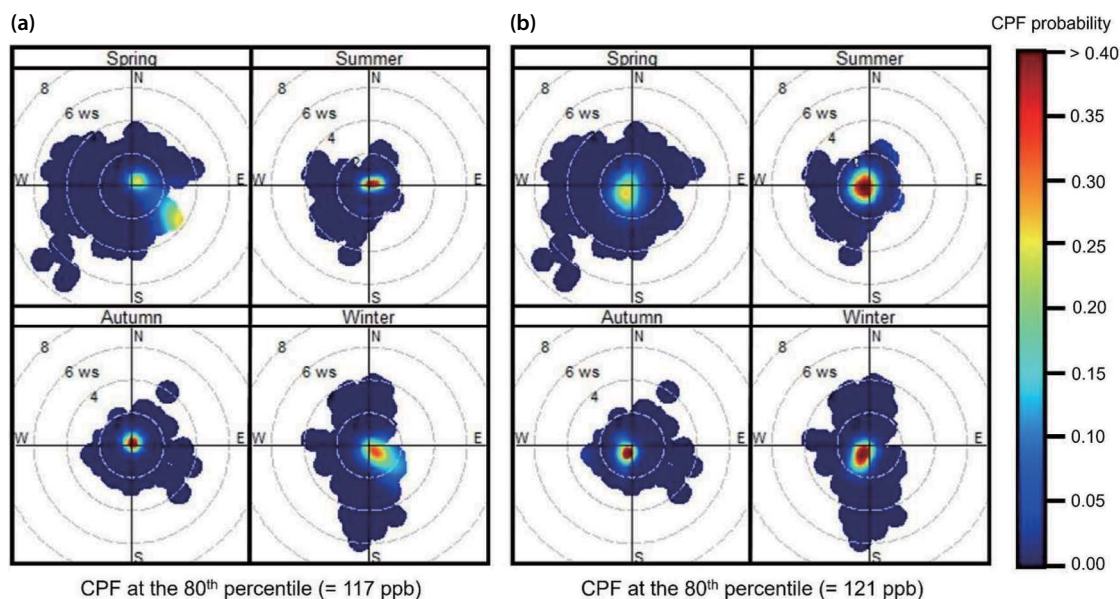
10배 이상 낮은 것으로 보고되었다(Sun *et al.*, 2015). 본 연구의 비행 결과에서도 작은 반경 비행에서는 계절에 관계 없이 고도가 낮아질수록  $\text{NH}_3$  농도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 양돈농가에서 직접 배출된  $\text{NH}_3$ 의 영향을 반영하는 것으로 보인다. 또한, 여름철에 가장 높은 농도가 기록된 것은 높은 기온과

PBLH로 인한 NH<sub>3</sub>의 광범위한 확산 결과로 해석된다. 반면, 큰 반경 비행에서는 봄철 상공 NH<sub>3</sub> 농도가 1,800~2,700 ft (약 548~823 m) 구간에서 높게 측정되어, 비료 살포 등 양돈시설 외부의 추가 배출원이 작용했을 가능성이 제기된다. 계절 및 고도별 농도 변화를 종합하면, 여름과 겨울의 경우 고도에 따른 뚜렷한 농도 변화가 미미한 것으로 나타났다. 이는 혼합고의 높이가 여름철에는 높게, 겨울철에는 최저비행고도 이하에서 형성된 결과로 해석된다. 다만, 본 연구의 항공관측은 각 계절별 1~2회에 불과하여 모든 계절을 대표하는 평균 농도를 제시하기에는 한계가 있다. 특히, 특정 시기의 기상 조건이나 일시적인 NH<sub>3</sub> 배출원의 영향을 완전히 배제할 수 없으므로, 향후 연구에서는 더 많은 관측자료를 확보하여 객관적이고 신뢰도 높은 계절별 NH<sub>3</sub> 농도를 분석할 필요가 있다.

### 3.3 암모니아 기원 분석 및 배출원별 농도 분포

측정 지역의 NH<sub>3</sub> 배출의 국지적 영향을 추적하기 위해 풍속, 풍향 및 지점별 80% 백분위수 이상의 고농도 NH<sub>3</sub> 자료(양돈농가 site #1: 121 ppb, 양돈농가 site

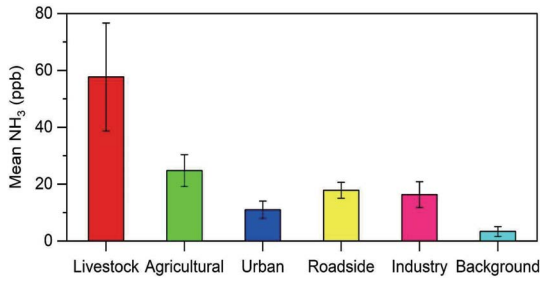
#2: 117 ppb)를 적용하여 CPF 모델링을 수행하였다 (그림 9). 양돈농가 site #1 지점에서 수행된 CPF 모델링 결과는 그림 9a에 정리하였으며, 전 계절 모두 백분위수 80% 이상의 고농도 NH<sub>3</sub>는 측정소 인근에서 발원한 것으로 파악되었다. 그림 9b에는 양돈농가 site #2 지점에서 수행된 CPF 결과를 나타내었다. 전 계절 모두 백분위수 80%의 고농도 NH<sub>3</sub>는 낮은 풍속 조건 (0~1 m/s)일 때 측정 지점 근처에서 발원했을 확률이 큰 것으로 조사되었다. 이는 김제시 양돈 밀집지역의 고농도 NH<sub>3</sub>가 인근의 고밀도 자연환기식 양돈농가로부터 발생했음을 시사한다. 더불어 연구 지역 전반에 걸쳐 NH<sub>3</sub> 농도가 매우 높게 나타나는 점을 고려할 때, 국외에서 기원한 NH<sub>3</sub>의 영향은 미미할 것으로 판단된다. 이와 같이 축산 밀집지역에서 배출되는 고농도 NH<sub>3</sub>는 수송으로 인해 인근 도심지역의 대기질을 크게 악화시킬 수 있는 것으로 보고되었으며(Oh *et al.*, 2021), Shim *et al.* (2022)은 수도권 도심지역에서 발생한 고농도 NH<sub>3</sub>의 대부분이 인근 농촌지역에서 발원했음을 지적한 바 있다. 따라서 대기질 개선을 위해 축산 활동이 활발한 배출원 지역에서 NH<sub>3</sub> 저감



**Fig. 9.** Results of CPF (conditional probability function) modeling in livestock area of Gimje from 2023 to 2024: (a) site #1 and (b) site #2.

**Table 2.** Comparison of atmospheric NH<sub>3</sub> concentrations at different locations.

Location	NH <sub>3</sub> (ppb)	Reference
<b>Livestock</b>		
Gimje, Korea	81.2 ± 75.1	This study
Jeongeup, Korea	55.8 ± 21.1	Oh <i>et al.</i> (2021)
Gucheng, China	36.2 ± 56.4	Meng <i>et al.</i> (2018)
Bertonico, Italy	41.1 ± 4.7	Lonati and Cernuschi (2020)
Kersey, USA	61.9 ± 10.1	Li <i>et al.</i> (2017)
Boryeong, Korea	85.3 ± 78.7	Jang <i>et al.</i> (2021)
Hongsung, Korea	62.9 ± 69.6	Jang <i>et al.</i> (2021)
Beijing, China	37.0 ± 17.2	Xu <i>et al.</i> (2014)
<b>Agricultural</b>		
Quzhou, China	31.2 ± 9.5	Xu <i>et al.</i> (2016)
Buan, Korea	23.9 ± 11.2	Kim <i>et al.</i> (2023b)
Chongming, China	23.2 ± 5.7	Xu <i>et al.</i> (2020)
Piadena, Italy	22.1 ± 3.8	Lonati and Cernuschi (2020)
Wangdu, China	31.2 ± 24.6	Liu <i>et al.</i> (2023)
Gochang, Korea	16.8 ± 5.1	Yu <i>et al.</i> (2024)
<b>Urban</b>		
Jeonju, Korea	10.9 ± 4.8	Park <i>et al.</i> (2021a)
Shanghai, China	7.8 ± 2.9	Chang <i>et al.</i> (2019)
Cremona, Italy	9.7 ± 2.6	Lonati and Cernuschi (2020)
Chengdu, China	13.2 ± 4.8	Huang <i>et al.</i> (2021)
Tianjin, China	15.8	Shi <i>et al.</i> (2019)
Ho Chi Minh, Vietnam	8.3 ± 2.5	Huy <i>et al.</i> (2017)
<b>Roadside</b>		
Seoul, Korea	12.3 ± 4.2	Phan <i>et al.</i> (2013)
Shanghai, China	17.2 ± 4.5	Chang <i>et al.</i> (2016)
Delhi, India	19.3 ± 4.4	Saraswati <i>et al.</i> (2018)
Beijing, China	18.2 ± 6.6	Zhang <i>et al.</i> (2018)
Gyeonggi, Korea	19.6 ± 6.2	Yu <i>et al.</i> (2024)
Münster, Germany	17.0	Ehrnsperger and Klemm (2020)
Dakar, Senegal	21.1	Adon <i>et al.</i> (2016)
<b>Industry</b>		
Pocheon, Korea	16.0 ± 3.9	Yu <i>et al.</i> (2024)
Beijing, China	11.3 ± 6.5	Wei <i>et al.</i> (2015)
Shanghai, China	17.6 ± 9.0	Wang <i>et al.</i> (2015)
Taichung, Taiwan	23.2 ± 8.5	Hsu <i>et al.</i> (2023)
Jeonju, Korea	13.4 ± 7.2	Park <i>et al.</i> (2021b)
<b>Background</b>		
Gunsan, Korea	4.8	Park <i>et al.</i> (2021b)
Moggio, Italy	4.6 ± 1.4	Lonati and Cernuschi (2020)
Ergun, China	4.1 ± 3.6	Pan <i>et al.</i> (2018)
Briggsdale, USA	4.2 ± 1.5	Li <i>et al.</i> (2017)
Yanggu, Korea	1.71 ± 0.96	Yu <i>et al.</i> (2024)
Southern Indiana, USA	1.0 ± 1.0	Hansen <i>et al.</i> (2015)



**Fig. 10.** Average NH<sub>3</sub> concentrations by emission source. The NH<sub>3</sub> data are based on previous studies summarized in Table 2.

이 필요하며, 더 많은 측정 연구가 필요할 것으로 사료된다.

국내의 다양한 배출원에서 측정된 대기 중 NH<sub>3</sub>의 농도를 비교하기 위해 표 2에 분석하였다. 배출원별 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 축산지역(57.7 ppb) > 농경지지역(24.7 ppb) > 도로이동오염원(17.8 ppb) > 산업지역(16.3 ppb) > 도심지역(11.0 ppb) > 배경지역(3.3 ppb) 순으로 나타났다(그림 10). 전반적으로 농축산지역에서 도심지역 및 배경지역 등 타 배출원들에 비해 상대적으로 매우 높은 NH<sub>3</sub> 농도가 관측되었다(Jang *et al.*, 2021; Oh *et al.*, 2021; Lonati and Cernuschi, 2020; Meng *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2014). 이는 축산분뇨, 비료시비 등 농업활동에 의한 NH<sub>3</sub> 배출이 주요 원인으로 작용한 것으로 해석된다. 본 연구에서 2023~2024년 김제시 양돈 밀집지역의 면단위 평균 NH<sub>3</sub> 농도는 81.2 ppb로, 이는 축산지역과 비교했을 시 국내 충청남도 보령시의 양돈 밀집지역과 유사한 수준이나(Jang *et al.*, 2021), 타 축산지역에 비해 1.5~2배 더 높은 것으로 확인되었다. 특히, 표 2에서 조사된 농경지지역, 도심지역 등과 비교했을 때 2.5~135배 높은 수준으로 파악되었다. 이러한 고농도 NH<sub>3</sub>는 타 배출원에 비해 양돈의 NH<sub>3</sub> 배출 기여가 상당함을 시사한다. 또한, 양돈 축사 내부의 NH<sub>3</sub>의 경우 9.1 ppm 수준으로, 부지경계에서 측정된 대기 중 농도인 0.1 ppm에 비해 약 100배 이상 높은 것으로 보고된 바 있다(Jang *et al.*, 2020).

## 4. 결 론

본 연구는 자연환기식 양돈 축산시설이 밀집된 전라북도 김제시 용지면에서 2023년 9월 22일부터 2024년 7월 4일까지 지상 및 항공 측정을 통해 대기 중 NH<sub>3</sub>의 공간적·시간적 분포를 분석하였다. 지상 NH<sub>3</sub> 농도의 경우, 양돈농가 site #1에서 69.0 ppb, 양돈농가 site #2에서 93.3 ppb로 관측되었으며, 면 단위 평균 농도는 81.2 ppb로 나타났다. 계절별 농도 차이는 미미한 수준으로 분석되었고, 양돈 밀집지역의 NH<sub>3</sub> 농도는 국내외 다른 주요 배출원에 비해 현저히 높은 수준을 보였다. 하루 중 NH<sub>3</sub> 농도는 주로 야간과 새벽 시간대에 급격히 상승하고 중간에 감소하는 경향을 나타냈다. 기상 요소와 NH<sub>3</sub> 농도의 상관성 분석 결과, 상대습도는 NH<sub>3</sub>와 강한 양의 상관관계( $R^2 > 0.9$ )를 보였으나, 기온과의 관계는 상대적으로 약한 것으로 확인되었다. 이는 자연환기식 축산시설에서 높은 습도가 NH<sub>3</sub> 배출 증가에 중요한 역할을 할 가능성을 시사한다. 또한 고농도의 NH<sub>3</sub>는 주로 측정 지점 인근의 양돈농가에서 기인한 것으로 나타났다.

항공 관측을 통해 NH<sub>3</sub>의 상공의 특성을 분석한 결과, 가을 8.8 ppb, 겨울 5.2 ppb, 봄 20.4 ppb, 여름 23.2 ppb로 나타났으며, 전반적으로 기온과 비례하는 경향을 보였다. 또한, 상공에서의 NH<sub>3</sub> 농도는 지상 측정 결과보다 현저히 낮은 수준을 기록하였는데, 이는 PBLH의 확장과 양돈농가의 배출 영향을 반영하는 것으로 판단된다. 본 연구는 NH<sub>3</sub> 농도와 기상자료를 기반으로 분석한 결과이며, 향후 대상지의 가축 사육 두수 및 비료 살포량 등 활동도 자료를 확보하여 축산지역의 NH<sub>3</sub> 배출 특성을 보다 면밀히 규명한다면, 국가 배출량 산정방법 고도화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 농·축산업에서 주로 배출되는 고농도 NH<sub>3</sub>는 인근 주민에게 악취를 유발하고, 이차 무기성 미세먼지의 생성에도 기여하는 것으로 보고되어 관리가 필요한 물질이다. 그러나 현재 국내에서는 이에 대한 측정 연구가 매우 부족한 실정으므로, 향후 지속적이고 장기적인 모니터링 체계 구축과

NH<sub>3</sub> 저감을 위한 정책적 지원이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2025년도 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행된 연구(대기 배출원별 암모니아 배출량 평가 및 개선 연구(III))임.

## References

- Adon, M., Yoboué, V., Galy-Lacaux, C., Liousse, C., Diop, B., Doumbia, E.H.T., Gardrat, E., Ndiaye, S.A., Jarnot, C. (2016) Measurements of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub> in West African Urban Environments, *Atmospheric Environment*, 135, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.050>
- Cabrera, M.L., Kissel, D.E., Craig, J.R., Qafoku, N.P., Vaio, N., Rema, J.A., Morris, L.A. (2010) Relative Humidity Controls Ammonia Loss from Urea Applied to Loblolly Pine, *Soil Science Society of America Journal*, 74(2), 543-549. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0220>
- Chang, Y., Zou, Z., Deng, C., Huang, K., Collett, J.L., Lin, J., Zhuang, G. (2016) The Importance of Vehicle Emissions as a Source of Atmospheric Ammonia in the Megacity of Shanghai, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(5), 3577-3594. <https://doi.org/10.5194/acp-16-3577-2016>
- Chang, Y., Zou, Z., Zhang, Y., Deng, C., Hu, J., Shi, Z., Dore, A.J., Collett Jr., J.L. (2019) Assessing Contributions of Agricultural and Nonagricultural Emissions to Atmospheric Ammonia in a Chinese Megacity, *Environmental Science & Technology*, 53(4), 1822-1833. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05984>
- Ehrnsperger, L., Klemm, O. (2020) Source Apportionment of Urban Ammonia and its Contribution to Secondary Particle Formation in a Mid-size European City, *Aerosol and Air Quality Research*, 21(5), 200404. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.07.0404>
- Hansen, K., Pryor, S.C., Boegh, E., Hornsby, K.E., Jensen, B., Sørensen, L.L. (2015) Background Concentrations and Fluxes of Atmospheric Ammonia over a Deciduous Forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 380-392. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.004>
- He, Y., Pan, Y., Zhang, G., Ji, D., Tian, S., Xu, X., Zhang, R., Wang, Y. (2020) Tracking Ammonia Morning Peak, Sources and Transport with 1 hz Measurements at a Rural Site in North China Plain, *Atmospheric Environment*, 235, 117630. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117630>
- Hsu, C.-Y., Hsu, T.-C., Chang, Y.-T., Shie, R.-H. (2023) Using Hybrid Methodologies to Characterize Temporal Behavior and Source of Ambient Ammonia, *Atmospheric Pollution Research*, 14(2), 101663. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101663>
- Huang, X., Zhang, J., Zhang, W., Tang, G., Wang, Y. (2021) Atmospheric Ammonia and Its Effect on PM<sub>2.5</sub> Pollution in Urban Chengdu, Sichuan Basin, China, *Environmental Pollution*, 291, 118195. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118195>
- Huy, D.H., Thanh, L.T., Hien, T.T., Noro, K., Takenaka, N. (2017) Characteristics of Ammonia Gas and Fine Particulate Ammonium from Two Distinct Urban Areas: Osaka, Japan, and Ho Chi Minh City, Vietnam, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 8147-8163. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8496-5>
- Jang, Y., Ha, T., Song, M., Seo, S., Jung, M., Kwon, K.-S. (2021) Characteristic of Atmospheric Ammonia in Swine Breeding Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 853-861, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.853>
- Jang, Y., Jo, G., Seo, S., Jung, M. (2020) A Comparison Study of Odor Characteristics According to Swine Facilities, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 19(1), 74-84, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2020.19.1.74>
- Kim, H., Park, J., Kim, S., Pawar, K.N., Song, M. (2023a) High Efficiency of Nitric Acid Controls in Alleviating Particulate Nitrate in Livestock and Urban Areas in South Korea, *Environmental Science: Atmospheres*, 3(2), 422-433. <https://doi.org/10.1039/D2EA00051B>
- Kim, M., Yu, G., Kim, J., Song, M., Oh, S., Choe, S., Jeon, H., Ko, D., Bae, M. (2023b) 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.1050>
- Korea Agency of Education, Promotion and Information Service in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (EPIS) (2024) 2023 Korean Agri-Food Farm Map Service. <https://agis.epis.or.kr/ASD/main/intro.do> (accessed 30 Aug 2024).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2024) Meteorologi-

- cal Information Portal Service System. <https://afso.kma.go.kr/> (accessed 02 Dec 2024).
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2024) Domestic Statistics, Korean Statistical Information System. <https://kosis.kr/index/index.do> (accessed 30 Dec 2024).
- Kumar, A., Patil, R.S., Dikshit, A.K., Kumar, R. (2019) Assessment of Spatial Ambient Concentration of NH<sub>3</sub> and its Health Impact for Mumbai City, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(1), 11-19. <https://doi.org/10.5572/ajae.2019.13.1.011>
- Li, Y., Thompson, T.M., Van Damme, M., Chen, X., Benedict, K.B., Shao, Y., Day, D., Boris, A., Sullivan, A.P., Ham, J., Whitburn, S., Clarisse, L., Coheur, P.F., Collett Jr., J.L. (2017) Temporal and Spatial Variability of Ammonia in Urban and Agricultural Regions of Northern Colorado, United States, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(10), 6197-6213. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6197-2017>
- Liu, P., Chen, H., Song, Y., Xue, C., Ye, C., Zhao, X., Zhang, C., Liu, J., Mu, Y. (2023) Atmospheric Ammonia in the Rural North China Plain During Wintertime: Variations, Sources, and Implications for HONO Heterogeneous Formation, *Science of The Total Environment*, 861, 160768. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160768>
- Lonati, G., Cernuschi, S. (2020) Temporal and Spatial Variability of Atmospheric Ammonia in the Lombardy Region (Northern Italy), *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2154-2163. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.004>
- McDuffie, E.E., Smith, S.J., O'Rourke, P., Tibrewal, K., Venkataraman, C., Marais, E.A., Zheng, B., Crippa, M., Brauer, M., Martin, R.V. (2020) A Global Anthropogenic Emission Inventory of Atmospheric Pollutants from Sector- and Fuel-Specific Sources (1970-2017): An Application of the Community Emissions Data System (Ceds), *Earth System Science Data Discussions*, 12(4), 3413-3442. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3413-2020>
- Meng, Z., Xu, X., Lin, W., Ge, B., Xie, Y., Song, B., Jia, S., Zhang, R., Peng, W., Wang, Y., Cheng, H., Yang, W., Zhao, H. (2018) Role of Ambient Ammonia in Particulate Ammonium Formation at a Rural Site in the North China Plain, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(1), 167-184. <https://doi.org/10.5194/acp-18-167-2018>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2024) 2022 Korea National Air Pollutants Emission. <https://airemiss.nier.go.kr> (accessed 12 Feb 2025).
- Oh, S., Kim, S.-G., Lee, J.B., Park, J., Jee, J.-B., Hong, S.-W., Kwon, K.-S., Song, M. (2021) Spatial Distributions of Atmospheric Ammonia in a Rural Area in South Korea and the Associated Impact on a Nearby Urban Area, *Atmosphere*, 12(11), 1411. <https://doi.org/10.3390/atmos12111411>
- Pan, Y., Tian, S., Zhao, Y., Zhang, L., Zhu, X., Gao, J., Huang, W., Zhou, Y., Song, Y., Zhang, Q., Wang, Y. (2018) Identifying Ammonia Hotspots in China Using a National Observation Network, *Environmental Science & Technology*, 52(7), 3926-3934. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05235>
- Park, J., Kim, E., Oh, S., Kim, H., Kim, S., Kim, Y.P., Song, M. (2021a) Contributions of Ammonia to High Concentrations of PM<sub>2.5</sub> in an Urban Area, *Atmosphere*, 12(12), 1676. <https://doi.org/10.3390/atmos12121676>
- Park, J., Oh, S., Bae, M.-S., Lim, Y.-J., Chang, Y., Song, M. (2021b) Spatial Distribution of Atmospheric Ammonia using Passive Samplers in Jeollabuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 626-636, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.4.626>
- Park, J., Ryoo, J., Jee, J., Song, M. (2020) Origins and distributions of atmospheric ammonia in Jeonju during 2019-2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 262-274, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.262>
- Park, T., Singh, R., Ban, J., Kim, K., Park, G., Kang, S., Choi, S., Song, J., Yu, D.-G., Bae, M.-S., Ahn, J., Jung, H.-J., Lim, Y.-J., Kim, H.W., Hwang, T.K., Choi, Y.J., Kim, S.-Y., Kim, H.S., Chang, Y.W., Shin, H.J., Lim, Y., Lee, J., Park, J., Choi, J., Lee, T. (2023) Seasonal and Regional Variations of Atmospheric Ammonia across the South Korean Peninsula, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00008-7>
- Pekney, N.J., Davidson, C.I., Zhou, L., Hopke, P.K. (2006) Application of PSCF and CPF to PMF-Modeled Sources of PM<sub>2.5</sub> in Pittsburgh, *Aerosol Science and Technology*, 40(10), 952-961. <https://doi.org/10.1080/02786820500543324>
- Phan, N.-T., Kim, K.-H., Shon, Z.-H., Jeon, E.-C., Jung, K., Kim, N.-J. (2013) Analysis of Ammonia Variation in the Urban Atmosphere, *Atmospheric Environment*, 65, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.049>
- Reche, C., Viana, M., Karanasiou, A., Cusack, M., Alastuey, A., Artiñano, B., Revuelta, M.A., López-Mahía, P., Blanco-Heras, G., Rodríguez, S., Sánchez de la Campa, A.M., Fernández-Camacho, R., González-Castanedo, Y., Mantilla, E., Tang, Y.S., Querol, X. (2015) Urban NH<sub>3</sub> Levels and Sources in Six Major Spanish Cities, *Chemosphere*, 119, 769-777. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.097>
- Reche, C., Viana, M., Pandolfi, M., Alastuey, A., Moreno, T., Amato, F., Ripoll, A., Querol, X. (2012) Urban NH<sub>3</sub> Levels and

- Sources in a Mediterranean Environment, *Atmospheric Environment*, 57, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.021>
- Saraswati, Sharma, S.K., Mandal, T.K. (2018) Five-Year Measurements of Ambient Ammonia and Its Relationships with Other Trace Gases at an Urban Site of Delhi, India, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130(2), 241-257. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0512-2>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons.
- Seo, B.-K., Park, S., Lee, D., Yu, M., Yu, J., Bae, K.-N., Ahn, J., Park, J., Kim, S., Lee, T., Kim, J. (2019) Airborne Inlets and Instrumentation on Aircraft Platform for Air Quality Observation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 815-830, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.815>
- Shi, X., Nenes, A., Xiao, Z., Song, S., Yu, H., Shi, G., Zhao, Q., Chen, K., Feng, Y., Russell, A.G. (2019) High-Resolution Data Sets Unravel the Effects of Sources and Meteorological Conditions on Nitrate and Its Gas-Particle Partitioning, *Environmental Science & Technology*, 53(6), 3048-3057. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06524>
- Shim, C., Han, J., Henze, D.K., Shephard, M.W., Zhu, L., Moon, N., Kharol, S.K., Dammers, E., Cady-Pereira, K. (2022) Impact of NH<sub>3</sub> Emissions on Particulate Matter Pollution in South Korea: A Case Study of the Seoul Metropolitan Area, *Atmosphere*, 13(8), 1227. <https://doi.org/10.3390/atmos13081227>
- Sun, K., Cady-Pereira, K., Miller, D.J., Tao, L., Zondlo, M.A., Nowak, J.B., Neuman, J.A., Mikoviny, T., Müller, M., Wisthaler, A., Scarino, A.J., Hostetler, C.A. (2015) Validation of Test Ammonia Observations at the Single Pixel Scale in the San Joaquin Valley During Discover-Aq, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 5140-5154. <https://doi.org/10.1002/2014JD022846>
- Sutton, M.A., Reis, S., Riddick, S.N., Dragosits, U., Nemitz, E., Theobald, M.R., Tang, Y.S., Braban, C.F., Vieno, M., Dore, A.J., Mitchell, R.F., Wanless, S., Daunt, F., Fowler, D., Blackall, T.D., Milford, C., Flechard, C.R., Loubet, B., Massad, R., Cellier, P., Personne, E., Coheur, P.F., Clarisse, L., Van Damme, M., Ngadi, Y., Clerbaux, C., Skjoth, C.A., Geels, C., Hertel, O., Wichink Kruit, R.J., Pinder, R.W., Bash, J.O., Walker, J.T., Simpson, D., Horváth, L., Misselbrook, T.H., Bleeker, A., Dentener, F., de Vries, W. (2013) Towards a Climate-Dependent Paradigm of Ammonia Emission and Deposition, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>
- Theobald, M.R., Sanz-Cobena, A., Vallejo, A., Sutton, M.A. (2015) Suitability and Uncertainty of Two Models for the Simulation of Ammonia Dispersion from a Pig Farm Located in an Area with Frequent Calm Conditions, *Atmospheric Environment*, 102, 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.056>
- Twigg, M.M., Berkhout, A.J.C., Cowan, N., Crunaire, S., Dammers, E., Ebert, V., Gaudion, V., Haaima, M., Häni, C., John, L., Jones, M.R., Kamps, B., Kentisbeer, J., Kupper, T., Lee-son, S.R., Leuenberger, D., Lüttschwager, N.O.B., Makkonen, U., Martin, N.A., Missler, D., Mounsor, D., Neftel, A., Nelson, C., Nemitz, E., Oudwater, R., Pascale, C., Petit, J.E., Pogany, A., Redon, N., Sintermann, J., Stephens, A., Sutton, M.A., Tang, Y.S., Zijlmans, R., Braban, C.F., Niederhauser, B. (2022) Intercomparison of in Situ Measurements of Ambient NH<sub>3</sub>: Instrument Performance and Application under Field Conditions, *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(22), 6755-6787. <https://doi.org/10.5194/amt-15-6755-2022>
- Wang, S., Nan, J., Shi, C., Fu, Q., Gao, S., Wang, D., Cui, H., Saiz-Lopez, A., Zhou, B. (2015) Atmospheric Ammonia and Its Impacts on Regional Air Quality over the Megacity of Shanghai, China, *Scientific Reports*, 5(1), 15842. <https://doi.org/10.1038/srep15842>
- Wei, L., Duan, J., Tan, J., Ma, Y., He, K., Wang, S., Huang, X., Zhang, Y. (2015) Gas-to-Particle Conversion of Atmospheric Ammonia and Sampling Artifacts of Ammonium in Spring of Beijing, *Science China Earth Sciences*, 58(3), 345-355. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4986-1>
- Xu, J., Chen, J., Zhao, N., Wang, G., Yu, G., Li, H., Huo, J., Lin, Y., Fu, Q., Guo, H., Deng, C., Lee, S.H., Chen, J., Huang, K. (2020) Importance of Gas-Particle Partitioning of Ammonia in Haze Formation in the Rural Agricultural Environment, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(12), 7259-7269. <https://doi.org/10.5194/acp-20-7259-2020>
- Xu, W., Wu, Q., Liu, X., Tang, A., Dore, A.J., Heal, M.R. (2016) Characteristics of Ammonia, Acid Gases, and PM<sub>2.5</sub> for Three Typical Land-Use Types in the North China Plain, *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 1158-1172. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5648-3>
- Xu, W., Zheng, K., Liu, X., Meng, L., Huaitalla, R.M., Shen, J., Hartung, E., Gallmann, E., Roelcke, M., Zhang, F. (2014) Atmospheric NH<sub>3</sub> Dynamics at a Typical Pig Farm in China and Their Implications, *Atmospheric Pollution Research*, 5(3), 455-463. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.053>
- Yu, G.-H., Shin, H.-J., Jung, H.-J., Song, M., Oh, S.-H., Choe, S., Kang, G.-U., Jeon, H., Bae, M.-S. (2024) Insights into National

Distribution of NH<sub>3</sub> Concentrations in Republic of Korea: Findings from Passive Sampler Observations and Implications for Sources and Management, *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2), 121. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12288-1>

Zhang, Y., Tang, A., Wang, D., Wang, Q., Benedict, K., Zhang, L., Liu, D., Li, Y., Collett Jr., J.L., Sun, Y., Liu, X. (2018) The Vertical Variability of Ammonia in Urban Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(22), 16385-16398. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16385-2018>

### Authors Information

최준혁 (전북대학교 환경에너지융합학과 석사후연구원)  
(ck35061@korea.kr)  
김연후 (전북대학교 환경에너지융합학과 석사과정)  
(yeonhoo1324@jbnu.ac.kr)

서범근 (한서대학교 환경연구소 책임연구원)  
(beomkeun@hanmail.net)  
아비나쉬 샤스트리 (전북대학교 환경에너지융합학과 박사과정)  
(202259013@jbnu.ac.kr)  
이미선 (한서대학교 항공우주공학부 환경·토목·건축학과 연구원)  
(k\_son@naver.com)  
김종호 (한서대학교 항공우주공학부 환경·토목·건축학과 교수)  
(kimjh@hanseo.ac.kr)  
홍세운 (전남대학교 농업생명과학대학 지역바이오시스템공학과 교수)  
(hsewoon@chonnam.ac.kr)  
김진식 (기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사) (jskim10@korea.kr)  
송형도 (기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구관) (hdsong@korea.kr)  
유철 (기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀장) (s7424yoo@korea.kr)  
송미정 (전북대학교 지구환경과학과 교수)  
(mijung.song@jbnu.ac.kr)