

논문

암모니아 배출원별 대기 중 암모니아 농도 분포 및 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향 연구: 전북 김제 지역의 실측 자료 중심으로

Distribution of Ambient Ammonia Concentrations by Emission Source and Its Influence on PM_{2.5} Levels: Evidence from Field Measurements in Gimje, Jeonbuk, Republic of Korea

이현아¹⁾, 최민석²⁾, 안영지²⁾, 김용현^{1),2),3),4),5),*}

¹⁾전북대학교 기후환경에너지융합학과, ²⁾전북대학교 환경에너지융합학과,

³⁾전북대학교 환경공학과, ⁴⁾전북대학교 토양환경연구센터, ⁵⁾전북특별자치도 환경보건센터

Hyun-A Lee¹⁾, Min-Seok Choi²⁾, Young-Ji An²⁾, Yong-Hyun Kim^{1),2),3),4),5),*}

¹⁾Department of Climate, Environment & Energy, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea

²⁾Department of Environment & Energy, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea

³⁾Department of Environmental Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea

⁴⁾Soil Environment Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea

⁵⁾Jeonbuk State Environment Health Center, Jeonju, Republic of Korea

접수일 2026년 6월 9일

수정일 2026년 6월 25일

채택일 2026년 6월 30일

Received 9 June 2026

Revised 25 June 2026

Accepted 30 June 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)63-270-2446

E-mail : ykim84@jbnu.ac.kr

Abstract Ammonia (NH₃) is a key precursor governing the formation of secondary inorganic aerosol (SIA) in PM_{2.5} through the production of ammonium sulfate and ammonium nitrate. In the Jeonbuk region of the Republic of Korea, where over 90% of NH₃ emissions originate from the agricultural sector, PM_{2.5} concentrations persistently exceed the national air quality standard, underscoring the urgent need for quantitative evidence to inform region-specific NH₃ management. However, studies that directly resolve the quantitative relationship between NH₃ and PM_{2.5} using concurrent field measurements—rather than monitoring or modeling approaches alone—remain limited. In this study, NH₃ and PM_{2.5} were simultaneously measured over 16 weeks during spring and autumn of 2025 at five sites representing distinct NH₃ emission characteristics (livestock facility, industrial complex, agricultural land, rural residential area, and background site) in the Gimje and Jeonju areas, and the quantitative coupling between the two pollutants was evaluated. NH₃ concentrations exhibited pronounced spatial differentiation, with a 10.8-fold difference among sites and decreasing in the order of the livestock facility (119.15 ± 35.40 ppb), rural residential area (29.17 ± 8.46 ppb), industrial complex (26.27 ± 6.56 ppb), agricultural land (15.91 ± 6.45 ppb), and background site (11.08 ± 3.37 ppb). In contrast, PM_{2.5} showed no statistically significant inter-site differences ($p = 0.184$), with a comparatively uniform overall mean concentration of 15.21 ± 8.42 μg m⁻³, confirming that the two pollutants are governed by fundamentally different atmospheric behaviors. Furthermore, the NH₃-PM_{2.5} relationship diverged into two distinct regimes as a function of NH₃ emission intensity, and the exponential decay of the NH₃/PM_{2.5} concentration ratio (μg m⁻³/μg m⁻³) with increasing PM_{2.5} concentrations ($R^2 = 0.553 \sim 0.874$) demonstrated that NH₃ functions as an actively consumed precursor in SIA formation across all sites. These findings provide empirical evidence that prioritizing emission control at high-emission NH₃ sources constitutes the most effective policy approach for region-wide PM_{2.5} management.

Key words: Ammonia (NH₃), PM_{2.5}, Secondary inorganic aerosol (SIA), Passive sampling, Agricultural emissions

1. 서 론

초미세먼지(fine particulate matter, PM_{2.5})는 대기 중 체류 시간이 길고 호흡기 깊숙이 침투하여 폐 기능 저하, 심혈관 질환, 조기 사망률 증가 등 다양한 건강 위험을 유발하는 대표적인 대기오염물질로(Li *et al.*, 2023; Cho *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2020; Pope *et al.*, 2019), 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 PM_{2.5}를 1군 발암물질로 지정하고 연평균 5 $\mu\text{g m}^{-3}$, 일평균 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 권고 기준을 설정한 바 있다(WHO, 2021). 대기 중 PM_{2.5}는 배출원에서 직접 방출되는 1차 생성과 기체상 전구물질의 대기 중 화학반응에 의한 2차 생성으로 구분되며, 후자의 주요 산물인 2차 생성 무기 에어로졸(secondary inorganic aerosol, SIA)은 PM_{2.5} 질량의 상당 부분을 차지한다(Shim *et al.*, 2022; Jordan *et al.*, 2020; Tao *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2014; KEI, 2012). SIA의 핵심 성분인 황산암모늄((NH₄)₂SO₄)과 질산암모늄(NH₄NO₃)은 암모니아(NH₃)가 대기 중에서 SO₂ 및 NO_x 산화물과 반응하여 생성되므로, NH₃는 PM_{2.5} 생성에 직접 기여하는 핵심 전구물질이자 효과적인 PM_{2.5} 관리를 위한 필수 저감 대상으로 인식된다(Wyer *et al.*, 2022; Fu *et al.*, 2017).

NH₃가 SIA 형성에 기여한다는 사실은 이론적·실험적으로 잘 확립되어 있으나, 실제 대기 환경에서 측정된 암모니아 농도와 PM_{2.5} 농도 사이의 정량적 관계를 실측 자료 기반으로 직접 규명한 연구는 상대적으로 희소하다. 질산염(NO₃⁻)의 경우, 야외 현장 측정을 통해 NO_x 배출량과 PM_{2.5} 내 질산염 농도 간 상관성을 정량화한 사례가 다수 보고되어 있으며(Li *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019), 황산염(SO₄²⁻)에 대해서도 SO₂ 배출 저감 정책 시행 후 PM_{2.5} 농도 변화를 추적한 실증 연구들이 축적되어 있다(Skylakou *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). 반면 NH₃ 경우, 대기 중 농도 분포 파악을 목적으로 한 모니터링 연구(Lô *et al.*, 2025; Pan *et al.*, 2018)나 모델링 기반의 기여도 평가 연구(Tang *et al.*, 2025)는 존재하나, 현장 실측 암모니아 농도를 직접 활용하여 PM_{2.5} 농도와의 정량적 관계를 경험적으로 도출한 연구는 국내외를 통틀어 극

히 제한적이다. 이는 큰 시공간적 변동성으로 인해 대표 농도 확보가 어려운 NH₃의 특성에서 기인하며, 결과적으로 NH₃ 배출 저감의 PM_{2.5} 개선 기여도를 정량화하는 데 중요한 과학적 공백이 존재한다.

전북특별자치도는 농생명 바이오, 특수목적용 지능형 기계 부품, 탄소융복합 소재를 3대 주축 산업으로 육성하고 있으며, 이 중 농생명 바이오 산업은 전북 지역 경제의 핵심을 이루고 있다(Kim *et al.*, 2024). 대기 정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 자료에 따르면, 2023년 기준 전국 암모니아 배출량의 84%가 농업 부문에서 발생하며, 전북 지역의 경우 이 비율이 94%에 달하는 것으로 나타나, 가축 분뇨 관리 및 비료 사용에서 기인하는 암모니아 배출이 타 지역에 비해 압도적으로 높다(CAPSS, 2023). 이러한 산업 특성은 전북 지역 PM_{2.5} 농도에도 직접적인 영향을 미쳐, 2015년 전북 지역의 PM_{2.5} 연평균 농도는 전국 최고 수준인 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ 를 기록하여 동기간 전국 평균(26 $\mu\text{g m}^{-3}$)을 약 30% 상회한 바 있다(NIER, 2015). 이후 지속적인 저감 노력에 따라 2024년 기준 16 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 감소하였으나, 이는 현행 대기환경기준(15 $\mu\text{g m}^{-3}$)을 여전히 초과하는 수치로, 전북 지역 특성에 기반한 지역 맞춤형 PM_{2.5} 관리 전략의 필요성이 지속적으로 요구된다. 특히 익산시를 중심으로 한 전라북도 PM_{2.5} 성분 분석 연구에서 SIA의 주요 성분인 NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻의 농도가 각각 8.9~12.5, 4.4~5.6, 3.7~4.6 $\mu\text{g m}^{-3}$ 수준으로 높게 나타난 결과(Nam *et al.*, 2023)는 전북 지역 PM_{2.5} 문제에서 암모니아 관리의 중요성을 직접적으로 시사한다.

본 연구에서는 축사 및 농경지가 밀집하고 산업단지가 공존하여 복합적인 NH₃ 배출이 예상되는 전북 특별자치도 김제시를 대상으로, 배출원 유형(축사, 산업단지, 농경지, 주거지)별 대기 중 NH₃ 및 PM_{2.5} 농도를 passive sampler와 Airbeam3를 이용하여 봄·가을 각 8주간 현장 실측하고, 두 오염물질 간의 정량적 관계를 경험적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 본 연구는 제한된 측정지점과 측정기간에서 확보된 농도 자료를 기반으로 하므로, 결과의 범용적 일반화에는 한계가 있지만, 실측 자료를 직접 활용하여 배출원별

암모니아 농도 분포와 $PM_{2.5}$ 농도와의 관계를 현장 기반으로 규명하고자 한 데 본 연구의 핵심적 의의가 있다. 본 연구 결과는 전북 지역 $PM_{2.5}$ 저감 정책 수립을 위한 과학적 근거 자료로 활용될 수 있으며, 향후 고농도 NH_3 배출원 중심의 정밀 모니터링 및 광역 NH_3 관리 체계 구축을 위한 방향성을 제시할 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

다음의 연구 절차는 대기 중 NH_3 농도가 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행되었다. NH_3 시료는 passive sampler로 채취한 뒤 ion chromatography (IC, Eco IC, Metrohm, Switzerland)로 분석하였다. $PM_{2.5}$ 시료는 광산란 방식의 $PM_{2.5}$ 측정기로 측정하였다. 분석 및 측정된 NH_3 , $PM_{2.5}$ 농도를 이용해 각 배출원별 농도 분포와 NH_3 와 $PM_{2.5}$ 의 상관성에 대해 평가하였다. 측정지점·기간과 시료 채취 및 분석에 대한 절차는 2.1~2.2절에서 제시한다.

2.1 측정지점 및 기간

본 연구의 측정지점은 전북특별자치도 김제시 (Point Gimje, PG) 내 주요 NH_3 배출원 유형을 대표할 수 있도록 4개 지점으로 선정하였으며, 전주시 (Point

Jeonju, PJ) 내 1개 배경지점을 포함하여 총 5개 지점에서 측정을 수행하였다(그림 1).

PG1은 농림축산식품부 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, MAFRA)의 가축 사육 분포 현황을 근거로 선정한 돈사 밀집 지역(용지면, 장신리 산 96-8)으로, 고농도 암모니아 배출이 상시 예상되는 축사지점에 해당한다(MAFRA, 2025a). PG2는 화학물질안전원 (National Institute of Chemical Safety) 자료 기준 2023년 연간 화학물질 배출량이 $7,189 \text{ kg yr}^{-1}$ 로 집계된 김제시 내 최대 규모 산업단지(지평선 산업단지, 백산면, 수록리 541-18)이다. PG3는 MAFRA (2025b)의 농작물 재배면적 자료를 바탕으로 선정한 논·밭 중심의 농경지 지점 (진봉면, 상평리 327-30)이며, PG4는 농촌형 주거지역 (청하면, 월현리 681-6)에 해당한다. 배경지점인 PJ는 특정 암모니아 배출원이 없는 도심 대기를 대표하는 지점으로, 전북대학교 공과대학 건물 옥상(덕진구, 백제대로 567)을 선정하였다.

측정기간은 강수 및 장마의 영향이 상대적으로 적은 봄철(1차: 2025.05.02.~2025.06.27.)과 가을철(2차: 2025.08.29.~2025.11.24.)로 구분하여, 각 8주간 총 16주에 걸쳐 수행하였다.

2.2 시료 채취 및 분석

각 측정지점(PG1~PG4, PJ)에는 NH_3 passive sampler, $PM_{2.5}$ 광학 센서, 온습도 데이터로거를 구성하여

Sampling period: May 2–Jun 27 (spring) and Aug 29–Nov 24 (fall), 2025



Fig. 1. Locations of the atmospheric NH_3 and $PM_{2.5}$ sampling sites (PG1~PG4 in Gimje and PJ in Jeonju) in Jeonbuk State, Republic of Korea, with a regional location map (centered on Gimje city).

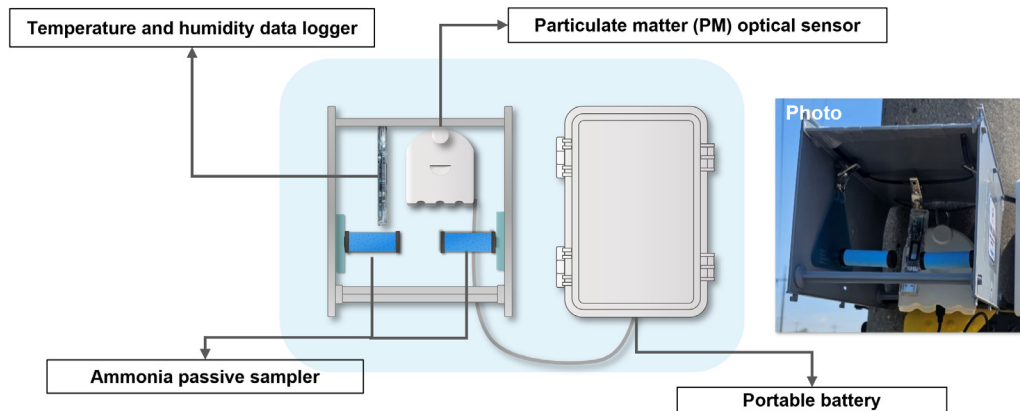


Fig. 2. Field installation configuration of the NH₃ passive sampler, PM_{2.5} sensor, and temperature/humidity data logger deployed at each sampling site.

동시 설치하였다(그림 2). 세 측정기기는 강수의 직접 유입을 차단하는 동시에 주변 대기와의 자유로운 공기 교환이 이루어지도록, 상부와 좌·우 양 측면만 차폐되고 전면·후면 및 하부가 개방된 차양형 박스 내부에 장착하였다. 이를 통해 강우로 인한 시료 손상을 방지하면서도 NH₃ 및 PM_{2.5}의 대기 확산 포집이 저해되지 않도록 하였다. 측정장비를 수용한 차양형 박스는 지면 먼지의 재비산 간섭을 최소화하고 인체 호흡 노출 높이를 대표할 수 있도록 지상 1.5~2 m 높이에 설치하였으며, 이는 대기오염물질 시료 채취 시 권고되는 호흡대(breathing zone) 기준에 부합한다(Petrus *et al.*, 2022). 한편 PM_{2.5} 광학 센서 및 온습도 데이터로거의 연속 전원 공급을 위한 외장 보조 배터리(M80, Morui, China; 80,000 mAh)는 강수로부터 보호하기 위해 별도의 밀폐형 방수함체에 수납하였으며, 함체 하부에 최소 크기의 통선구만을 천공하여 전원 케이블을 인출함으로써 측정부와 전원부를 물리적으로 분리하였다. 주간 NH₃ sampler 교체 시 PM_{2.5} 센서 및 온습도 데이터로거도 충전된 예비 기기로 동시 교체하여 16주 측정기간 전반에 걸쳐 세 가지 항목의 동시·연속 자료를 확보하였다.

2.2.1 NH₃

대기 중 NH₃ 농도 측정을 위해 별도의 전력 공급 장

치 없이 운용 가능한 passive sampler (RAD168, Radiello, Italy)를 사용하였다. 해당 sampler의 운용 가능 조건은 상대습도(RH) 10~90%, 온도 2~39°C이며, 24시간 노출 기준 검출한계는 1 µg m⁻³이다. 시료 채취는 2개의 sampler를 지점당 병행 설치하여 7±0.5일 간격으로 교체하는 방식으로 수행하였으며, 주간 누적 NH₃ 농도를 확보하였다. 회수된 sampler cartridge는 즉시 밀봉하여 실험실로 운반하였으며, 전처리 및 정량 분석 방법은 2.3절에 상세히 기술하였다.

2.2.2 PM_{2.5}

대기 중 PM_{2.5} 농도의 실시간 측정을 위해 광산란 방식의 광학 센서(Airbeam3, HabitatMap, USA)를 사용하였다. 본 기기는 32 GB 내장 저장장치에 1시간 간격으로 PM_{2.5} 농도 데이터를 자동 기록한다. 기기의 측정 성능은 저비용 대기질 센서 평가 분야의 국제 표준 기관인 South Coast Air Quality Management District (South Coast AQMD) 산하 Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC)의 독립 평가를 통해 검증된 바 있다. 기준 온도 20°C, RH 40% 조건에서 79~97%의 측정 정확도가 보고되었으며, US EPA FEM 인증 기기인 Teledyne T640x와 GRIMM EDM-180의 비교 분석에서 실내 조건 R²>0.99, 실외 24시간 평균 0.89<R²<0.91의 높은 상관성이 확인되

었다(South Coast AQMD, 2022a, 2022b). 또한, Airbeam3와 동일한 센서를 사용하는 Airbeam2 모델과 국내 PM_{2.5} 공정시험법인 베타선 감쇠법(Beta Attenuation Monitor) 기반 기기(Met One BAM, Met One Instruments, USA)와의 비교에서도 24시간 평균 $R^2 \approx 0.84$ 로 양호한 일치도를 나타내었다(South Coast AQMD, 2018).

2.2.3 온습도계

NH₃ 농도 산출에 필요한 현장 기상 자료 확보 및 PM_{2.5} 측정값에 대한 습도 영향 평가를 위해 온습도 데이터로거(RX-350TH, As One, Japan)를 사용하였다. 본 장비의 측정 범위는 온도 -20~70°C, RH 5~90%이며, 측정 정확도는 각각 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ (온도; 25°C 기준) 및 $\pm 4\%$ (RH; 20~80% 기준)이다. 데이터는 1시간 간격으로 자동 기록되며, 최대 저장 용량은 15,000 records이다. 현장 실측 온습도 자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 공식 관측 자료와의 비교·검증을 통해 누락 자료 보완 및 자료 신뢰성 평가에 활용하였다.

2.3 NH₃ passive sampler 전처리 및 분석

현장에서 회수된 NH₃ passive sampler cartridge는 즉시 밀봉한 후 실험실로 운반하여 분석 전까지 온도 4°C의 냉암소(GMSR-680, GMS, Republic of Korea)에 보관하였다. 전처리는 cartridge 내 adsorbent에 포집된 NH₄⁺를 수용액으로 용출하는 방식으로 수행하였다. 구체적으로, cartridge에 증류수(distilled water, D.W.) 10 mL를 첨가한 후 초음파 추출기(POWER SONIC 620, Hwashin Tech, Republic of Korea)를 이용하여 45 min간 초음파 처리함으로써 흡착제로부터 NH₄⁺를 완전히 용출시켰다. 추출된 용액은 입자상 불순물 제거를 위해 0.2 µm syringe filter (PTFE-H, HYUNDAI MICRO, Republic of Korea)로 여과한 후 IC 분석 시료로 사용하였다(그림 S1).

NH₄⁺ 농도 정량 분석은 양이온 IC를 사용하여 수행하였다. 분석 컬럼은 Metrosep C4-150/4.0 (길이 150 mm, 내경 4 mm)을 사용하였으며, 용리액은 HNO₃

(34 mmol L⁻¹)과 dipicolinic acid, 14 mmol L⁻¹)의 혼합 용액(5% v/v, 1:19)을 유량 0.9 mL min⁻¹으로 공급하였다.

2.4 NH₄⁺ 검량 및 QC 자료 확보

2.4.1 NH₄⁺ 표준시료 준비

NH₄⁺ 정량 분석을 위한 검량선 작성에는 고순도 혼합 표준용액(IC-4-100, high-purity standards, USA; NH₄⁺ 인증 농도 $100 \pm 2 \mu\text{g mL}^{-1}$)을 primary standard (PS)로 사용하였다. PS를 D.W.로 10배 희석하여 농도 10 µg mL⁻¹의 1st working standard (1st WS)을 조제한 후, 이를 단계적으로 희석하여 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 µg mL⁻¹의 5개 농도로 구성된 final working standard (F-WS1~F-WS5)을 조제하였다. Working standards의 희석은 모두 D.W.를 사용하였으며, 각 조제 단계에서의 부피 및 희석 비율은 표 S1에 상세히 제시하였다.

2.4.2 Calibration 및 QC 결과

조제된 5점 F-WSs를 IC로 분석한 크로마토그램과 검량선을 그림 S2에 제시하였다. NH₄⁺는 Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 등 공존 양이온과 명확히 분리되어 검출되었으며(그림 S2a), 0.1~2.0 µg mL⁻¹ 농도 범위에서 $R^2 > 0.9999$ 의 우수한 직선성을 확인하였다(그림 S2b, c). 1차(2025.06.23.) 및 2차(2025.10.20.) 검량 결과에서 기울기는 각각 0.1405 및 0.1398 mL µg⁻¹으로 유사하게 나타나 분석 조건의 재현성과 안정성이 확보되었음을 확인하였다.

방법검출한계(method detection limit, MDL)는 저농도 표준시료(F-WS1, 0.1 µg mL⁻¹)를 동일 분석 조건에서 7회 반복 측정 후 Student's t-value (자유도 6, 신뢰구간 99%)를 적용하여 산출하였으며, 1차 및 2차 모두 0.043 µg mL⁻¹로 동일하게 산출되었다. 이를 현장 평균 온도(25°C) 및 1기압 조건에서 passive sampler 채취 부피(1,975 L)를 고려하여 대기 중 농도로 환산하면 약 0.031 ppb에 해당한다. 반복 재현성은 F-WS3 (0.5 µg mL⁻¹)을 3회 반복 측정 후 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)로 평가하였으며, 1차 및 2차 검량에서 각각 0.98% 및 1.21%로 우수한 분석

재현성이 확인되었다.

2.4.3 대기 중 NH₃ 농도 평가

IC 분석으로 확보한 NH₄⁺ peak area는 검량선(그림 S2b, c)의 기울기(slope)와 희석배수(dilution factor, 10 or 20)를 적용하여 희석 전 시료 추출액 내 NH₄⁺ 농도(μg mL⁻¹)로 환산하였다(식 1). 산출된 NH₄⁺ 농도는 Radiello passive sampler의 확산 특성에 기반한 Fick의 확산법칙(Fick's law of diffusion)을 적용하여 대기 중 NH₃ 농도(μg m⁻³, 식 2)로 변환한 후, 이상기체법칙(ideal gas law)을 적용하여 최종적으로 혼합비 단위인 ppb로 환산하였다(식 3).

$$C_{NH_4} (\mu g mL^{-1}) = \frac{\text{Peak area}}{\text{Slope (mL } \mu g^{-1})} \times \text{Dilution factor (10 or 20)} \quad (1)$$

$$C_{NH_3} (\mu g m^{-3}) = \frac{m_{NH_4^+} \times 10^6 (cm^3 m^{-3})}{t \times \left(D_0 \times \left(\frac{P_0}{P} \right) \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.81} \right) \times A / \Delta X} \quad (2)$$

$$C_{NH_3} (ppb) = [C_{NH_3} (\mu g m^{-3}) \times 0.082057 (L atm mol^{-1} K^{-1}) \times (273.15 K + T) / P] / MW_{NH_3} (g mol^{-1}) \quad (3)$$

식 (2)에서 m_{NH₄⁺}는 IC로 정량된 NH₄⁺ 질량(μg), t는 시료채취 시간(s), A/ΔX는 sampler의 유효 단면적 대 확산 거리 비(cm²/cm, 14.2 cm), D₀는 표준 조건(T₀=273.15 K, P₀=1 atm)에서 NH₃의 대기 중 확산계수(diffusion coefficient, 0.1978 cm² s⁻¹), T와 P는 각각 측정지점의 평균 대기 온도(K)와 대기압(atm)을 의미한다.

대기 중 NH₃ 농도 산출에 사용된 현장 기상 자료는 각 측정지점에 설치한 온습도 데이터로거(2.2.3절)로부터 확보한 1시간 간격의 기온 평균값을 적용하였다. 기기 오작동 또는 배터리 방전 등으로 누락된 구간의 자료는 KMA 공식 관측 자료로 대체하였으며, 대체 자료의 신뢰성 확보를 위해 양 자료 간의 정합성을 사전 검증하였다. 검증 결과, 실측값과 KMA 관측값 간 평

균 기온 차이는 PG 지점군(Gimje)에서 1.17°C, PJ 지점(Jeonju)에서 2.16°C로, 양 지점 모두 평균 10% 미만의 오차 범위 내에서 일치하여 누락 자료 보완을 위한 대체 자료로서의 적합성이 확인되었다(그림 S3).

3. 결과 및 고찰

3.1 배출원별·계절별 대기 중 NH₃ 농도 분포

3.1.1 배출원별 NH₃ 농도 차이 및 시계열 변동

2025년 봄철(1차: W1~W8)과 가을철(2차: W9~W16)에 걸쳐 총 16주간 주간 누적 방식으로 측정한다섯 지점(PG1~PG4, PJ)의 대기 중 NH₃ 농도는 배출원 유형에 따라 뚜렷한 농도 계층을 형성하였다(그림 3, 표 1A). 지점별 평균 농도는 축사(PG1)가 119.15 ± 35.40 ppb로 가장 높았으며, 이어 농촌 주거지(PG4) 29.17 ± 8.46 ppb, 산업단지(PG2) 26.27 ± 6.56 ppb, 농경지(PG3) 15.91 ± 6.45 ppb, 배경지점(PJ) 11.08 ± 3.37 ppb 순으로 관측되었다. 일원배치 분산분석(one-way ANOVA) 결과 지점 간 농도 차이는 통계적으로 매우 유의하였다(F(4, 75) = 112.43, p = 6.89 × 10⁻³¹).

특히 PG1의 평균 농도는 배경지점(PJ) 대비 약 10.8배, 차순위인 PG4 대비로도 약 4.1배에 이르러, 축사 배출원이 연구 지역의 NH₃ 농도 분포를 주도하는 지배적 배출원임을 명확히 시사한다. 이는 2023년 기준 전북 지역 NH₃ 배출량의 94%가 농업 부문에서 기인한다는 국가 대기오염물질 배출 인벤토리(CAPSS, 2023) 집계와 정합하며, 전국 평균(84%)을 상회하는 전북 지역의 배출 구조 비대칭성이 김제 권역의 주간 실측 농도 수준에서 그대로 재현됨을 의미한다. 또한 농촌 주거지(PG4)의 평균 농도가 PG2를 근소하게 상회한 점은, 주거지 주변에 산재한 소규모 축사 및 경지로부터의 확산적(diffusive) 배출이 산업단지의 점원(point source) 배출을 양적으로 능가함을 시사한다. 한편 PG3의 평균 농도가 PG4 및 PG2보다 낮게 관측된 것은 농경지 배출이 비료 사용기에 집중된 간헐적 특성을 갖기 때문으로 판단된다.

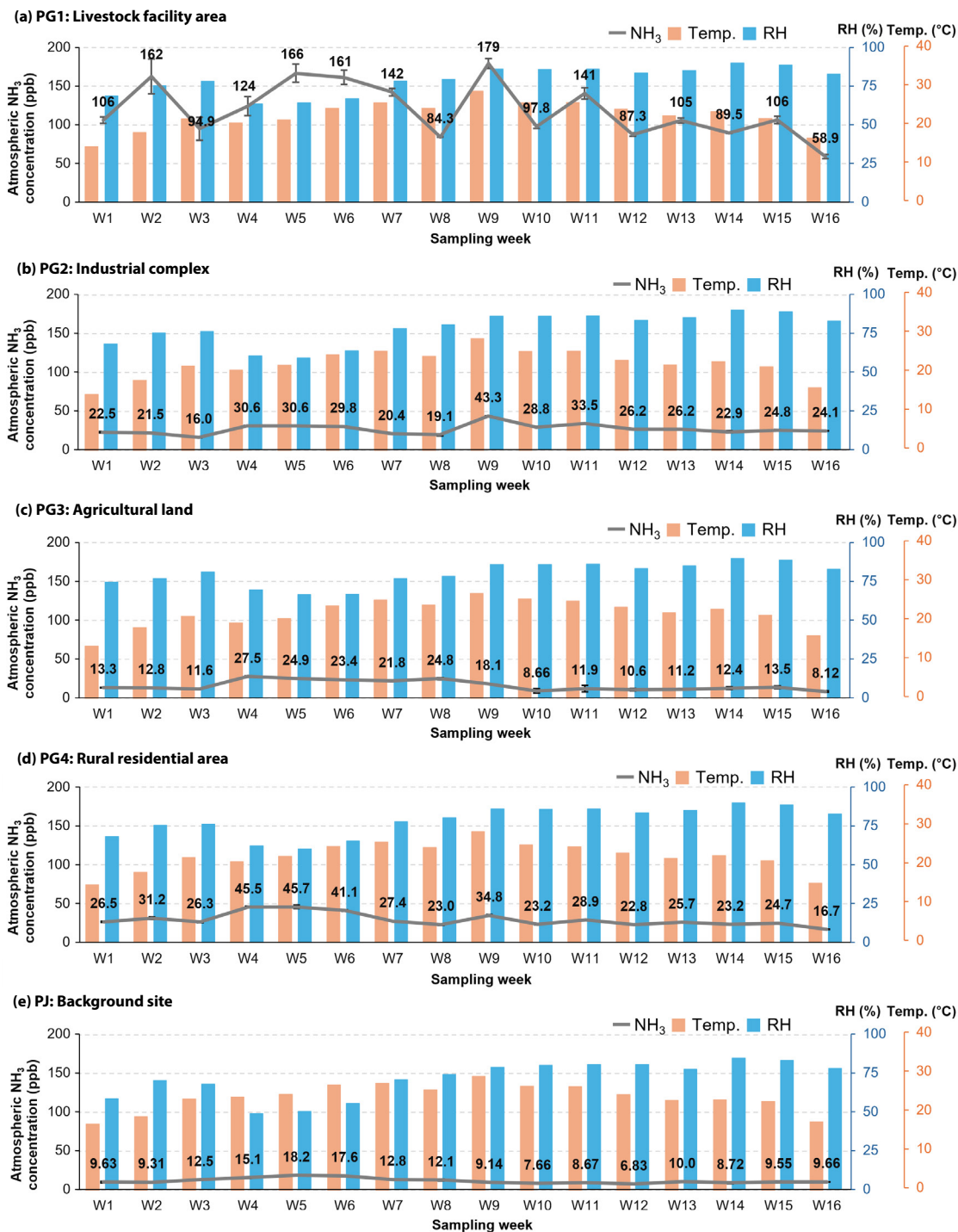


Fig. 3. Weekly atmospheric NH₃ concentrations at each emission source site, shown alongside corresponding relative humidity (RH) and temperature (Temp.): (a) PG1, (b) PG2, (c) PG3, (d) PG4, and (e) PJ.

Table 1. Descriptive statistics, one-way ANOVA, and Pearson correlation results for atmospheric NH₃ concentrations at each emission source site over the 16-week sampling period.^a

A. Descriptive statistics of atmospheric NH₃ concentrations and one-way ANOVA results

Order	Site	<i>n</i>	Mean (ppb)	SD (ppb)	Min (ppb)	Max (ppb)	Median (ppb)
1	PG1	16	119.15	35.40	58.88	179.08	106.11
2	PG2	16	26.27	6.56	15.96	43.31	25.49
3	PG3	16	15.91	6.45	8.12	27.54	13.05
4	PG4	16	29.17	8.46	16.66	45.73	26.39
5	PJ	16	11.08	3.37	6.83	18.16	9.65

One-way ANOVA: $F(4, 75) = 112.43, p = 6.89 \times 10^{-31}$.

B. Pearson correlation coefficients (R) between atmospheric NH₃ concentration and meteorological variables

Order	Site	<i>n</i>	Temperature vs. NH ₃		Relative humidity vs. NH ₃	
			R	<i>p</i>	R	<i>p</i>
1	PG1	16	+0.3139	0.236	-0.3851	0.141
2	PG2	16	+0.4870	0.056	-0.0081	0.976
3	PG3	16	+0.1509	0.577	-0.7269	0.001
4	PG4	16	+0.2235	0.405	-0.7628	< 0.001
5	PJ	16	+0.1999	0.458	-0.8321	< 0.001

^aWeekly-integrated NH₃ concentrations (*n* = 16 per site) collected from 2 May to 24 November 2025.
SD, standard deviation.

배출원별 농도 변동성 역시 배출 강도 및 시간적 분포 특성과 대체로 대응되었다. PG1에서는 주간 농도가 58.88~179.08 ppb의 넓은 범위로 변동하였고 (CV ≈ 29.7%), 이는 축사 환기, 분뇨 반출·교반, 주변 경지 시비 등 불연속·간헐적 배출 사건이 주간 누적 농도에 직접 반영된 결과로 해석된다. 반면 PG2 (15.96~43.31 ppb, CV ≈ 25.0%), PG4 (16.66~45.73 ppb, CV ≈ 29.0%), PJ (6.83~18.16 ppb, CV ≈ 30.4%)는 상대적으로 좁은 절대 농도 폭을 유지하였으며, PG3 (8.12~27.54 ppb)은 CV가 약 40.5%로 가장 높아 비료 시용에 수반된 단기 집중적 고농도 사건이 주간 변동성에 크게 기여하였음을 시사한다.

시계열 측면에서는 다섯 지점이 계절 최고치의 위상에 있어 배출원 특성에 따른 뚜렷한 차이를 드러내었다. PG1과 PG2에서는 2차 측정(가을철) 초입인 W9에서 관측 최고치가 확인된 반면(각각 179.08 및 43.31 ppb), PG3, PG4, PJ에서는 1차 측정(봄철) 중반인 W4~W5에서 최고치가 관측되었다(각각 27.54, 45.73, 18.16 ppb). 이러한 위상 차는 배출 기작의 이원성을 반

영하는 것으로 해석된다. PG1과 PG2에서는 W9 시점의 주 평균 기온이 28°C를 상회하는 고온 조건 하에서 가축 분뇨 및 토양·산업 원료로부터의 열적 휘발이 강화된 것이 최고치 형성에 기여한 것으로 보이며, 특히 PG2의 경우 산업 고유 배출에 더해 인근 축산·농경 배출의 하계 대기 축적 및 확산 기여가 중첩되었을 가능성이 높다. 반면 PG3, PG4, PJ에서는 춘계 기비·추비 시용에 수반된 단기 고농도 배출 사건이 관측 농도의 계절 최댓값을 결정된 것으로 판단된다. 한편, 측정 종료 구간인 W14~W16에 걸쳐 모든 지점에서 농도 감소가 공통적으로 확인되었으며, PG1, PG3, PG4는 W16에서 각각의 관측 최저치(58.88, 8.12, 16.66 ppb)에 도달하여 늦가을 저온 조건 하에서의 휘발 억제가 시계열 말미에 공통적으로 작용하였음을 시사한다.

기상학적 구동력의 일차적 기여는 Pearson 상관분석 결과(표 1B)에서 확인된다. 상대습도(RH)와 NH₃ 농도 간에 PG3 ($R = -0.727, p = 0.001$), PG4 ($R = -0.763, p < 0.001$), PJ ($R = -0.832, p < 0.001$)에서 통계적으로 유의한 강한 음의 상관이 관측되어, 확산적·배경성 배

출이 우세한 지점에서는 기상 조건이 시계열 변동의 주요 결정 요인으로 작용함을 뒷받침한다. 반면 배출 강도가 크고 국지적 배출 사건의 빈도가 높은 PG1과 PG2에서는 기온·RH와의 Pearson 상관계수가 모두 통계적으로 유의하지 않아($p > 0.05$), 기상학적 구동 효과가 국지 배출 변동성에 의해 상쇄된 결과로 해석된다. 기상 인자별 상대적 기여에 관한 심층 분석 및 다변량 상관 구조는 3.3절에서 상세히 논의한다.

3.1.2 배출원 간 거리에 따른 NH_3 농도 상관성

다섯 측정지점 간 NH_3 시계열의 공간적 상관 구조를 평가하기 위해, 각 기준 지점과 나머지 네 지점 간의 주간 누적 NH_3 농도 Pearson 상관계수(R)를 산출하고 이를 지점 간 직선 거리(km)에 대응시켜 분석하였다(그림 4). 이론적으로 두 지점이 공통 배출원 또는 유사한 기상 영향권에 놓일 경우, 거리 증가에 따라 농도 상관성이 감소하는 거리 감쇠 경향이 기대된다.

PG1과 PG2에서는 이러한 이론적 기대와 부합하는 negative slope이 관찰되었다(PG1: slope = -0.023, $R^2 = 0.331$; PG2: slope = -0.021, $R^2 = 0.513$). 특히 PG2는 최

근접 지점인 PG4(3.5 km)와 $R = 0.482$ 를 보인 반면, 최장 이격 지점인 PJ(24.0 km)와는 $R = 0.024$ 에 불과하여, 산업단지 점원 배출의 공간적 감쇠 특성이 비교적 뚜렷하게 표출되었다.

반면, PG3와 PG4에서는 거리 증가에 따라 오히려 상관성이 증가하는 positive slope이 확인되어(PG3: slope = +0.014, $R^2 = 0.301$; PG4: slope = +0.010, $R^2 = 0.409$), 기존 거리 감쇠 이론과 상반되는 양상을 나타내었다. 이는 본 연구 지역의 지점 간 상관 구조가 지리적 인접성이 아니라 배출원 유형의 유사성에 의해 지배적으로 결정되었음을 시사한다. 구체적으로, PG3는 최근접 지점인 PG2(8.5 km)와의 상관성이 $R = 0.173$ 에 불과한 반면, 최장 이격 지점인 PJ(32.6 km)와는 $R = 0.804$ 로 가장 강한 상관을 나타내었다. 이는 PG3와 PJ 모두 강한 국지적 NH_3 배출원이 부재한 확산적·배경성 농도 특성을 공유하는 반면, 인접한 PG2는 산업 고유의 점원 배출 특성으로 인해 근접 거리에도 불구하고 시계열 변동 패턴이 근본적으로 상이하였기 때문으로 해석된다. PG4 역시 동일 논리로, 최근접 지점인 PG2(3.5 km)와의 상관성($R = 0.482$)이 원격

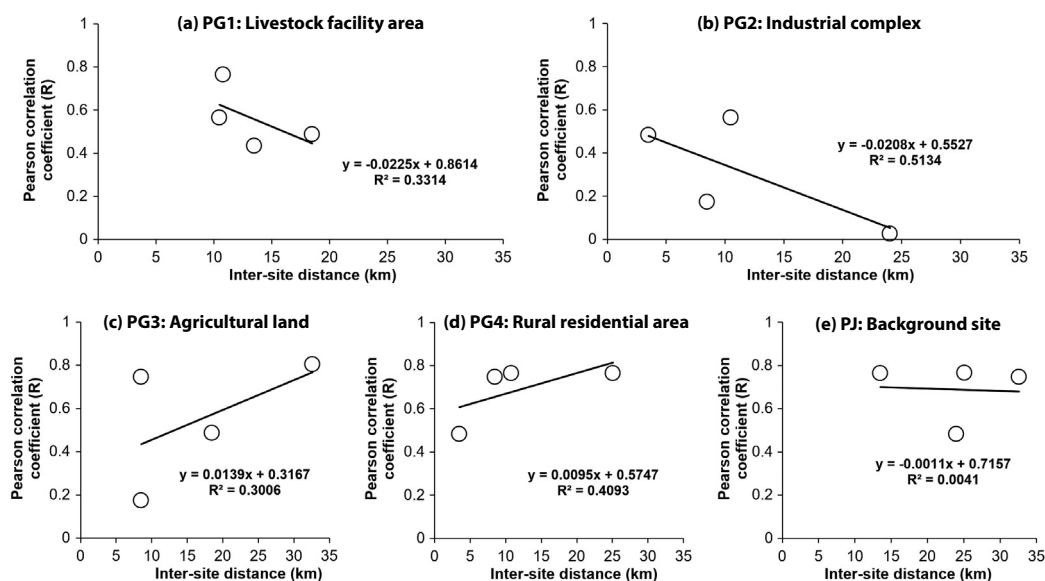


Fig. 4. Relationship between inter-site distance and Pearson correlation coefficient (R) of atmospheric NH_3 concentrations for each emission source site. (a) PG1, (b) PG2, (c) PG3, (d) PG4, and (e) PJ.

지점인 PG1 (10.8 km, $R=0.763$) 및 PJ (25.1 km, $R=0.764$)와의 상관성보다 현저히 낮게 관측되었다.

PJ에서는 거리와 상관성 간에 뚜렷한 경향이 관찰되지 않았다($\text{slope} = -0.001$, $R^2 = 0.004$). 이는 PJ가 특정 배출원의 영향을 일관되게 받기보다 도심 대기의 혼합된 배경 농도 특성을 반영하기 때문으로 판단된다.

종합하면, 본 연구 지역의 NH₃ 공간 상관 구조는 지리적 거리보다는 배출원 유형 간 유사성에 의해 지배적으로 결정되는 것으로 판단되며, 이는 향후 passive sampler 기반 NH₃ 모니터링 네트워크 설계 시 거리 기반 지점 배치보다 배출원 특성 기반 지점 구성이 공간적 대표성 확보에 효과적일 수 있음을 시사한다.

3.1.3 계절별(봄·가을) NH₃ 농도 비교

16주 측정기간을 봄철(1차: W1~W8, $n=8$)과 가을철(2차: W9~W16, $n=8$)로 구분하여 배출원별 평균 NH₃ 농도를 비교한 결과, PG1, PG3, PG4, PJ의 네 지점에서는 봄철 농도가 가을철보다 높게 관측된 반면, PG2에서는 이와 상반되는 양상이 확인되었다(그림 S4a).

봄철 우세 경향을 보인 지점들에서 봄철 대비 가을철 평균 농도 감소율은 PG3 (41.0%) > PJ (34.5%) > PG4 (25.0%) > PG1 (17.0%) 순으로 나타났다. 감소폭이 가장 큰 PG3과 PJ는 자체 배출 강도가 상대적으로 낮아 국내 영농 일정상 기비와 추비가 3~6월에 집중되는 데 따른 토양 및 가축 분뇨 기원 NH₃ 휘발 배출의 계절적 차이에 상대적으로 민감하게 반응한 것으로 판단된다(Marais *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2020). 반면 PG1의 감소율이 가장 낮게 나타난 것은 축사로부터의 상시 고배출이 계절 변동성을 상쇄하였기 때문으로 해석된다. 한편 2차 측정이 11월 중·하순까지 확장되어 W14~W16 구간의 저온 조건에서 휘발이 억제된 점(3.1.1절)도 가을철 평균을 하향시키는 데 일정 부분 기여한 것으로 판단된다.

반면 PG2에서는 가을철 평균 농도(28.73 ppb)가 봄철(23.81 ppb)보다 약 21% 높은 역전 양상이 관찰되었다. 이는 산업 기원 NH₃ 배출이 영농 주기에 구속되지

않는 인위적 공정 배출 특성을 반영하는 것으로 해석되며(Yan *et al.*, 2024), 가을철 평균을 상향시킨 직접적 요인은 3.1.1절에서 기술한 바와 같이 W9의 관측 최고치(43.31 ppb)가 가을철 평균에 포함된 결과이다.

종합하면, 본 연구 지역의 NH₃ 계절 변동은 농업 부문 배출원에서는 봄철 우세의 전형적 양상을 보인 반면, 산업 부문 배출원에서는 이러한 계절적 동조성이 약화되는 것으로 확인되었다. 이러한 배출원별 계절성의 이원적 구조는 후속 3.2절에서 논의하는 계절별 PM_{2.5} 농도 분포와의 연동 구조 해석에 중요한 기저를 제공한다.

3.2 배출원별·계절별 대기 중 PM_{2.5} 농도 분포

3.2.1 배출원별 PM_{2.5} 농도 차이 및 시계열 변동

16주 측정기간 동안 다섯 지점에서 확보한 주간 평균 PM_{2.5} 농도는 PG2 (18.49 $\mu\text{g m}^{-3}$) > PG1 (17.08 $\mu\text{g m}^{-3}$) > PG3 (14.94 $\mu\text{g m}^{-3}$) > PG4 (13.57 $\mu\text{g m}^{-3}$) > PJ (11.98 $\mu\text{g m}^{-3}$) 순으로 산출되었다(그림 5, 표 2A). 그러나 최고 지점(PG2)과 최저 지점(PJ) 간 평균 농도 비는 약 1.5배에 그쳤으며, one-way ANOVA 분석 결과 지점 간 농도 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($F(4, 75) = 1.60$, $p = 0.184$).

이러한 결과는 NH₃에서 관측된 지점 간 최대 10.8 배의 격차 및 매우 높은 유의성($F(4, 75) = 112.43$, $p = 6.89 \times 10^{-31}$; 표 1A)과 뚜렷이 대비되며, 본 연구 지역에서 NH₃ 농도가 배출원 유형에 의해 지배적으로 결정되는 것과 달리, PM_{2.5} 농도는 배출원 유형에 따른 공간적 차별화가 통계적 유의성에 도달하지 못하는 수준으로 축소되었음을 의미한다. 이는 PM_{2.5}의 대기 중 체류 시간이 수일~수주로 NH₃ (수 시간~수일)에 비해 현저히 길어 광역 규모의 대기 혼합과 수송이 우세하게 작용하며(Seinfeld and Pandis, 2016), 전북 권역 PM_{2.5} 질량의 상당 부분이 SIA 및 장거리 수송 기여로부터 구성된다는 선행 관측 결과(Nam *et al.*, 2023)와 정합적이다.

이러한 공간적 균질성은 주간 시계열 변동 양상에서도 일관되게 확인된다(그림 5). 다섯 지점의 농도가 고

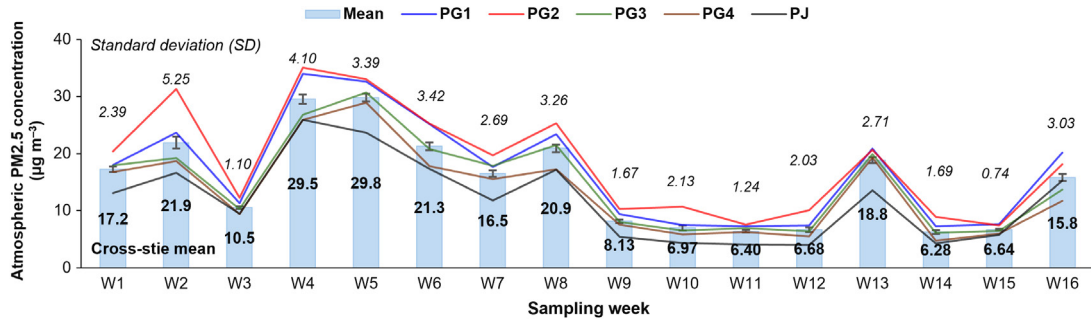


Fig. 5. Weekly atmospheric PM_{2.5} concentrations at each emission source site. Bar graph represents the cross-site mean(± SD) for each sampling week, and lines indicate concentrations at individual sites.

Table 2. Descriptive statistics, one-way ANOVA, and Pearson correlation results for atmospheric PM_{2.5} concentrations at each emission source site over the 16-week sampling period.^a

A. Descriptive statistics of atmospheric PM_{2.5} concentrations and one-way ANOVA results

Order	Site	n	Mean (µg m ⁻³)	SD (µg m ⁻³)	Min (µg m ⁻³)	Max (µg m ⁻³)	Median (µg m ⁻³)
1	PG1	16	17.08	9.16	7.29	33.99	17.82
2	PG2	16	18.49	9.39	7.42	35.05	18.88
3	PG3	16	14.94	7.99	6.14	30.69	15.77
4	PG4	16	13.57	7.58	4.75	28.92	13.64
5	PJ	16	11.98	7.09	4.01	25.91	12.44

One-way ANOVA: F(4, 75) = 1.60, $p = 0.184$.

B. Pearson correlation coefficients (R) between atmospheric PM_{2.5} concentration and meteorological variables

Order	Site	n	Temperature vs. PM _{2.5}		Relative humidity vs. PM _{2.5}	
			R	p	R	p
1	PG1	16	-0.3959	0.129	-0.8378	<0.001
2	PG2	16	-0.3475	0.187	-0.8184	<0.001
3	PG3	16	-0.3584	0.173	-0.8634	<0.001
4	PG4	16	-0.2450	0.360	-0.8376	<0.001
5	PJ	16	-0.2362	0.379	-0.8330	<0.001

^aWeekly-integrated PM_{2.5} concentrations (n = 16 per site) collected from 2 May to 24 November 2025.
SD, standard deviation.

도로 동조적으로 변동하여, W4~W5에서 모든 지점이 연중 최고치(교차지점 평균 29.54 및 29.78 µg m⁻³)를 공통적으로 기록하였고, W9~W12 및 W14~W15 구간에서는 공통적으로 최저 농도(교차지점 평균 6.28~8.13 µg m⁻³)가 유지되었다. 주간 지점 간 SD는 광역 저농도 구간에서 0.74~2.13 µg m⁻³로 수렴된 반면, 봄철 고농도 구간(W2, W4~W8)에서는 2.69~5.25 µg m⁻³로 확대되어, 절대 농도 수준이 높은 시기일수록

국지 배출원의 기여가 상대적으로 가시화되는 구조를 보여준다.

RH와의 상관분석에서는 배출원 유형에 관계 없이 모든 지점에서 매우 강한 음의 상관(R = -0.818~-0.863, 모두 $p < 0.001$)이 확인되었다(표 2B). 이는 NH₃에서 RH 상관이 확산적·배경성 배출 우세 지점(PG3, PG4, PJ)에만 제한적으로 발현된 결과(표 1B)와 구분되며, PM_{2.5}의 시계열 변동이 국지 배출 특성과

무관하게 광역 기상 조건에 일관되게 동조함을 시사한다. 한편 기온과 PM_{2.5} 간에는 모든 지점에서 약한 음의 상관($R = -0.236 \sim -0.396$)이 관측되었으나, 어느 지점에서도 통계적 유의성에 도달하지 못하였다(모두 $p > 0.12$). 기상 인자의 세부 기여 구조는 3.3절에서 다룬다.

종합하면, 본 연구 지역의 PM_{2.5} 농도 변동은 국지 배출원의 기여보다는 광역 기상 조건 및 지역 배경 부하에 의해 일차적으로 지배되는 것으로 파악된다. 계절별 농도 분포에 관한 상세 분석은 3.2.2절에서 이어 전개한다.

3.2.2 계절별(봄·가을) PM_{2.5} 농도 비교

16주 측정기간을 봄철(1차: W1~W8, $n=8$)과 가을철(2차: W9~W16, $n=8$)로 구분하여 배출원별 평균 PM_{2.5} 농도를 비교한 결과, 모든 측정지점에서 예외 없이 봄철 농도가 가을철 농도를 현저히 상회하는 일관된 경향이 확인되었다(그림 S4b). 구체적으로, 봄철 대비 가을철 평균 농도 감소율은 PJ (58.0%) > PG4 (55.5%) > PG3 (55.2%) > PG2 (53.7%) > PG1 (52.9%) 순으로, 모든 지점에서 약 53~58% 범위에 수렴하였으며, 봄·가을 농도 비 또한 2.12~2.38배로 매우 유사한 수준을 보였다. 5개 지점 전체를 통합한 pooled 비교에서도 봄철 평균($20.95 \pm 7.05 \mu\text{g m}^{-3}$)과 가을철 평균($9.47 \pm 5.11 \mu\text{g m}^{-3}$) 간에 통계적으로 매우 유의한 차이가 확인되었다(independent t -test: $t=8.34$, $p=2.04 \times 10^{-12}$).

이러한 봄철 우세 양상은 광역 기상 조건과 전구물질 가용성이라는 두 가지 인자가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 먼저 광역 기상 조건 측면에서는, 봄철 정체성 고기압하의 약한 대기 혼합과 낮은 행성 경계층 고도에 따른 오염물질 축적(Foskinis *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2022a) 및 동북아 장거리 수송 기여의 계절적 증가로 볼 수 있으며(Ryu and Min, 2024; Lee *et al.*, 2022b), 동시에, NH₃ 역시 농업 부문 배출원과 배경지점에서 봄철 우세 양상을 보였음을 고려할 때(3.1.3절), 봄철 PM_{2.5} 고농도는 SIA 전구물질인 NH₃의 봄철 집중 공급이 광역 축적 조건과 중첩되어 형성된 결과

로 해석될 수 있다.

NH₃에서 관측된 계절성의 배출원 의존적 이원 구조(농업 부문은 봄철 우세, 산업 부문은 가을철 우세; 3.1.3절)와 달리, PM_{2.5}는 모든 배출원 유형에서 동질적인 봄철 우세 양상을 보였다. 이러한 대조는 두 오염물질의 지배적 구동 기작 차이, 즉 NH₃의 국지 배출원 특성 반영 대 PM_{2.5}의 광역 기상 조건 의존을 재차 뒷받침한다.

한편 본 연구의 봄철 관측치는 다수의 주에서 WHO 일평균 권고 기준($15 \mu\text{g m}^{-3}$)을 상회하였으며, 배경지점인 PJ의 봄철 평균($16.87 \mu\text{g m}^{-3}$)도 국내 연평균 대기환경기준($15 \mu\text{g m}^{-3}$)을 초과하여, 전북 권역의 PM_{2.5} 관리 필요성이 봄철을 중심으로 지속됨을 재확인하였다. NH₃와 PM_{2.5} 간의 정량적 상관 구조 및 NH₃의 PM_{2.5} 생성 상대기여도에 관한 직접적 평가는 3.4절에서 본격적으로 다룬다.

3.3 기상 조건이 NH₃ 및 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향

3.3.1 측정지역의 풍향·풍속 분포 특성

16주 측정기간 동안 김제(PG) 및 전주(PJ) 두 권역의 풍향·풍속 분포를 바람장미 형태로 그림 S5에 제시하였다. 두 권역 모두 남풍 계열(SSW-SSE)이 지배적 풍향으로 확인되었으며, 풍속은 주로 $1 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$ 범위에 분포하였다.

김제 권역(그림 S5a)에서는 SSW 방향의 출현 빈도가 전체 약 55%로 가장 높았고 SSE 방향이 약 30% 수준의 부차적 빈도를 보였으며, 풍속은 $2 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$ 구간이 우세하였다. 전주 권역(그림 S5b) 역시 S 방향이 약 55%로 가장 우세하게 나타났으나, 풍속 분포는 $1 \sim 2 \text{ m s}^{-1}$ 의 저풍속 구간에 더 집중되어, 김제 권역 대비 상대적으로 정체적인 대기 조건을 보였다.

이러한 남풍계 우세와 저풍속 조건은 한반도 중서부 내륙의 여름~가을철 대기 특성과 정합하며(Kim and Kang, 2012; Ahn and Kim, 2010), 배출원으로부터 방출된 NH₃ 및 PM_{2.5} 전구물질의 국지 축적 및 단거리 이류에 유리한 환경을 제공한다. 김제 권역 내 측정

지점들의 상대 배치(그림 1)를 고려할 때, 남풍계 하에서 PG1~PG4 지점들은 상호 풍하 관계로 배치되어 배출원 간 대기 혼합이 활발히 이루어졌을 가능성이 있으며, 이는 3.1.2절에서 관측된 배출원 유형 유사성에 기반한 공간 상관 구조와도 부합한다.

3.3.2 기상 변수와 농도 간 다변량 상관 구조 분석(PCA)

NH₃ 및 PM_{2.5} 농도와 기상 변수(기온, RH, 풍속, 풍향) 간의 다변량 상관 구조를 보조적으로 확인하기 위해 지점별 주성분 분석(principal component analysis, PCA)을 수행하였다(그림 S6). 다섯 지점 모두에서 제 1·제 2 주성분이 전체 분산의 약 62.6~67.7%를 설명하였으며, PM_{2.5}와 RH가 상반된 방향으로 강하게 투영되어 3.2.1절에서 제시한 두 변수 간 강한 음의 상관 구조가 다변량 수준에서도 일관되게 재확인되었다.

NH₃의 투영 구조는 배출원 유형에 따라 차이를 보였다. 확산적·배경성 배출이 우세한 PG3, PG4, PJ에서는 NH₃가 PM_{2.5}와 유사한 방향성을 보여 두 오염물질이 공통의 기상 요인에 의해 동시적으로 변조되는 경향이 나타난 반면, 국지 배출이 우세한 PG1과 PG2에

서는 NH₃가 PM_{2.5}와 뚜렷한 방향성을 공유하지 않았다. 이는 각각 표 1B 및 3.1.1절에서 확인된 지점별 NH₃-RH 상관 양상과 부합하는 결과로, NH₃가 배출원 유형에 따라 기상 동조형과 국지 배출 주도형으로 구분됨을 보조적으로 뒷받침한다. PG3, PG4, PJ에서 관측된 NH₃-PM_{2.5}의 동조 경향에 대한 정량적 평가는 3.4절에서 다룬다.

3.4 대기 중 NH₃의 PM_{2.5} 생성 기여도 평가

3.4.1 배출원별 NH₃와 PM_{2.5} 농도 간 선형 상관분석

각 측정지점에서 16주간 확보된 주간 NH₃ 및 PM_{2.5} 농도 자료($n=16$)에 대하여 선형 회귀분석을 수행한 결과, 지점별 결정계수(R^2)와 회귀 기울기가 배출원 유형에 따라 뚜렷한 두 군집으로 분리되는 양상이 확인되었다(그림 6).

해석에 앞서, 본 분석에서 다루는 NH₃와 PM_{2.5}의 관계는 동일 배출원에서 직접 생성된 일대일 인과 관계가 아님을 전제할 필요가 있다. PM_{2.5}는 대기 중 체류 시간이 길어 상당 부분이 외부에서 유입·노화(aging)

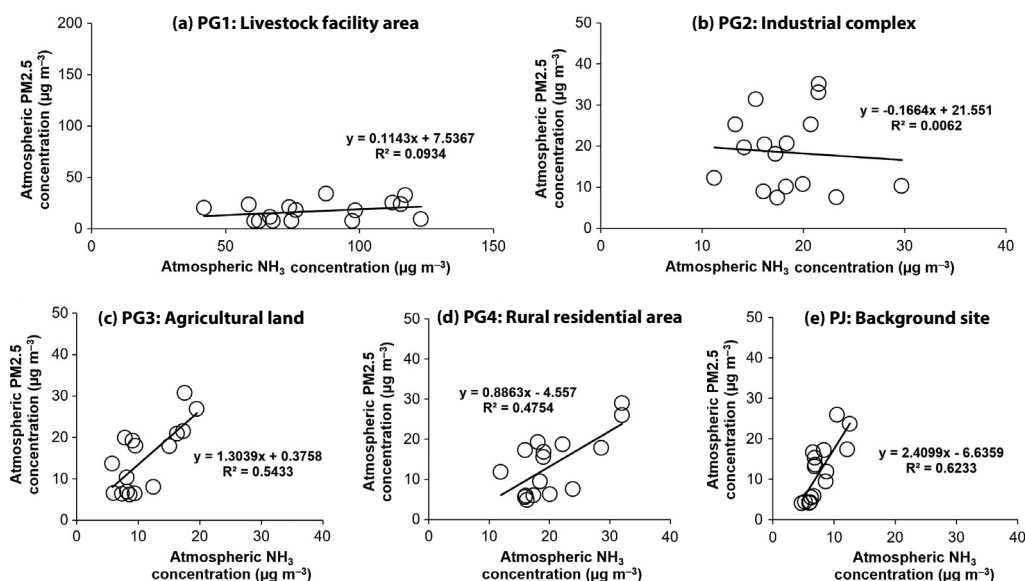


Fig. 6. Linear regression analysis between atmospheric NH₃ and PM_{2.5} concentrations at each emission source site. (a) PG1, (b) PG2, (c) PG3, (d) PG4, and (e) PJ.

된 입자로 구성되므로 (3.2.1절), 본 절의 상관 분석은 국지 NH₃ 농도와 광역적으로 혼합된 PM_{2.5} 간의 통계적 연관성을 나타내는 것으로 신중히 해석되어야 한다. 확산적·배경성 배출이 우세한 PG3, PG4, PJ에서는 NH₃와 PM_{2.5} 농도 간 뚜렷한 양의 선형 상관관계가 관측되었다. 배경지점인 PJ의 R²이 0.623으로 가장 높았으며, 이어 PG3 (R²=0.543), PG4 (R²=0.475) 순으로 나타났다. 회귀 기울기 또한 PJ (2.41) > PG3 (1.30) > PG4 (0.89) 순으로 산출되어, NH₃ 배경 농도 수준이 낮은 지점일수록 단위 NH₃ 증가분에 대한 PM_{2.5} 증가폭이 큰 구조가 확인된다. 이는 전구물질인 NH₃가 제한 인자(limiting reagent)로 작용하는 조건에서 NH₃ 증가가 SIA 생성에 직접적으로 반영되는 것과 정합하며 (Jung *et al.*, 2026; Yin *et al.*, 2018), 3.3.2절의 PCA 분석에서 세 지점이 PM_{2.5}와 동일 축 방향을 공유하였던 관찰을 정량적으로 뒷받침하는 결과이다.

반면 국지 배출이 우세한 PG1과 PG2에서는 NH₃와 PM_{2.5} 농도 간 유의한 선형 관계가 확인되지 않았다 (PG1: R²=0.093, slope=0.114; PG2: R²=0.006, slope=-0.166). 두 지점에서의 낮은 상관성은 NH₃

자재가 부족해서가 아니라 오히려 NH₃가 과잉 공급 (NH₃-rich) 조건에 놓여, NH₃ 농도 변동이 SIA 생성 속도를 지배하지 않는 상태를 시사한다. 이 경우 PM_{2.5} 농도는 공존 전구물질(SO₂, NO_x)의 가용성 또는 광역 기상 조건에 의해 일차적으로 결정되며 (Kim *et al.*, 2021; Wen *et al.*, 2018), NH₃-PM_{2.5} 관계의 선형성이 무너지게 된다. 이러한 해석은 3.3.2절의 PCA에서 PG1과 PG2의 NH₃ 로딩 벡터가 PM_{2.5}와 직교에 가까운 방향 관계를 형성한 결과와 구조적으로 합치한다.

종합하면, 본 연구 지역에서 NH₃-PM_{2.5} 간 선형 상관 구조는 지점의 NH₃ 배출 강도에 따라 이원적으로 분화되어, NH₃가 상대적으로 제한된 확산적·배경성 배출 지점에서는 PM_{2.5} 생성에 유효한 결정 인자로 작용하는 반면, NH₃가 과잉 공급되는 고배출 지점에서는 그 직접적 기여가 통계적으로 감지되지 않았다. 이러한 체계 의존적 반응 구조를 고려한 정량적 기여도 평가는 3.4.2절에서 이어 다룬다.

3.4.2 PM_{2.5} 농도에 따른 NH₃ 상대기여도 평가

3.4.1절의 선형 회귀 분석은 NH₃의 절대 농도 변동

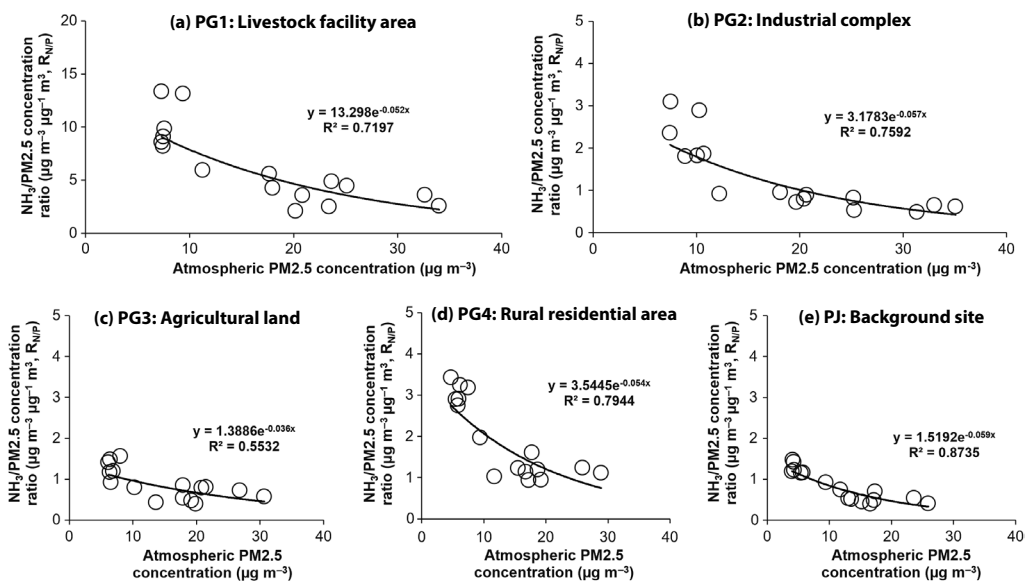


Fig. 7. Exponential regression analysis between atmospheric PM_{2.5} concentration and the NH₃-to-PM_{2.5} concentration ratio (NH₃/PM_{2.5}) as an indirect indicator of the relative contribution of atmospheric NH₃ to PM_{2.5} formation at each emission source site. (a) PG1, (b) PG2, (c) PG3, (d) PG4, and (e) PJ.

이 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 일차적 영향을 확인시켜 주었으나, 지점별 NH_3 배출 강도 차이로 인해 절대 농도 기반 지표만으로는 “대기 중 NH_3 중 얼마만큼이 $PM_{2.5}$ 질량으로 전환되었는가”를 직접 평가하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 각 주간 관측치에 대해 $NH_3/PM_{2.5}$ 농도비 ($\mu g\ m^{-3}/\mu g\ m^{-3}$, 이하 $R_{N/P}$)를 산출하고, 이를 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 지수 회귀한 관계식을 그림 7에 제시하였다. $R_{N/P}$ 는 단위 $PM_{2.5}$ 질량당 대기 중에 잔류한 미반응 NH_3 의 양을 반영하므로, $R_{N/P}$ 의 감소는 NH_3 가 $PM_{2.5}$ 생성에 상대적으로 더 많이 소비되었음을 간접적으로 지시하는 지표로 사용될 수 있다(Choi *et al.*, 2025; Xie *et al.*, 2020).

다섯 지점 모두에서 $PM_{2.5}$ 농도 증가에 따라 $R_{N/P}$ 는 지수적으로 감소하는 일관된 경향이 확인되었다(그림 7). R^2 은 PJ (0.874) > PG4 (0.794) > PG2 (0.759) > PG1 (0.720) > PG3 (0.553) 순으로 산출되어, 전반적으로 강한 비선형 상관 구조가 유지되었다. 이러한 지수형 감쇠 양상은 $PM_{2.5}$ 농도가 낮을 때에는 단위 질량당 상대적으로 많은 NH_3 가 대기 중에 잔류해 있다가, $PM_{2.5}$ 농도가 상승함에 따라 NH_3 의 SIA 전환 기여가 증가하여 대기 중 잔류 NH_3 비율이 감소하는 과정으로 해석될 수 있다(Kim *et al.*, 2021).

감쇠 속도(지수 계수의 절댓값)는 PJ (0.059) $\approx$ PG2 (0.057) $\approx$ PG4 (0.054) $\approx$ PG1 (0.052) > PG3 (0.036) 순으로 산출되어, PG3을 제외한 네 지점에서 유사한 감쇠율이 확인되었다. 이는 PG3의 상대적으로 완만한 감쇠가 비료 사용에 수반된 간헐적 단기 고농도 NH_3 배출 사건(3.1.1절)에 의해 회귀 관계가 부분적으로 분산된 결과로 해석된다. 한편 절편(pre-exponential factor)은 PG1 (13.3) $\gg$ PG4 (3.5) $\approx$ PG2 (3.2) > PJ (1.5) $\approx$ PG3 (1.4) 순으로 뚜렷한 지점 간 차이를 보였는데, 이는 각 지점의 기저 NH_3 배출 강도를 반영하는 것으로, 3.1.1절에서 확인된 지점별 평균 NH_3 농도 계층(PG1 $\gg$ PG4 > PG2 > PG3 > PJ)과 정합한다.

종합하면, $R_{N/P}$ 의 지수적 감쇠 구조는 본 연구 지역 전체에 걸쳐 NH_3 가 $PM_{2.5}$ 농도 상승 시 SIA 형성에 적극적으로 기여하는 활성 전구물질로 작용함을 다섯

지점 공통적으로 확인시켜 주는 결과이다. 특히 3.4.1절에서 절대 농도 기반 선형 상관성이 감지되지 않았던 PG1과 PG2에서도 $R_{N/P}$ 지표에서는 높은 R^2 (0.72 및 0.76)이 확인되었는데, 이는 두 지점의 고배출·과잉 공급(NH_3 -rich) 조건하에서도 $PM_{2.5}$ 농도가 상승할수록 NH_3 의 상대적 소비가 증가함을 의미한다. 다만 본 연구에서 활용한 $R_{N/P}$ 지표는 국지 NH_3 농도와 광역적으로 혼합된 $PM_{2.5}$ 질량의 비에 기반하므로, 이는 측정지점에서의 직접적 SIA 생성량이 아니라 NH_3 소비 경향을 간접적으로 반영하는 지표임을 유의할 필요가 있다. 이러한 점은 고려하더라도, 본 결과는 NH_3 배출 저감이 전 배출원 유형에 걸쳐 $PM_{2.5}$ 관리에 기여할 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

본 연구에서는 NH_3 배출 특성이 구분되는 다섯 지점(축사, 산업단지, 농경지, 주거지, 배경: 도심 대기)에서 NH_3 와 $PM_{2.5}$ 를 동시 실측하고 두 오염물질 간 정량적 관계를 현장 자료 기반으로 규명하였으며, 그간 모니터링 또는 모델링 단일 접근에 머물러 있던 NH_3 - $PM_{2.5}$ 관계 연구에 현장 실측 기반의 새로운 패러다임을 제시하였다는 점에서 학술적 의의를 갖는다. 특히 본 연구는 단일 분석 기법에 의존하지 않고, 기술통계와 분산분석을 통한 농도 분포 비교, 거리 기반 공간상관 분석, 주성분 분석을 통한 다변량 구조 규명, 그리고 선형·지수 회귀를 통한 정량적 기여도 평가에 이르는 다층적 분석 체계를 단계적으로 적용함으로써, 배출원별 NH_3 - $PM_{2.5}$ 연동 구조를 다각도로 입증하였다.

핵심 학술적 함의는 다음과 같다. 첫째, NH_3 농도는 배출원 유형에 의해 지배적으로 결정되어 강한 공간적 차별화를 보인 반면 $PM_{2.5}$ 는 광역 기상 조건에 의해 동질적으로 변동함으로써, 두 오염물질이 본질적으로 상이한 대기 거동을 가짐을 정량적으로 입증하였다. 둘째, 두 오염물질의 관계가 NH_3 배출 강도에

따라 이원적으로 분화됨을 규명하였다. 즉, NH₃가 제한 인자로 작용하는 확산적·배경성 배출 지점에서는 NH₃ 농도가 PM_{2.5} 생성을 직접 결정하는 반면, NH₃가 과잉 공급되는 고배출 지점에서는 절대 농도 상관성이 소실되나 NH₃/PM_{2.5} 비를 활용한 상대 지표를 통해 NH₃가 모든 지점에서 SIA 형성에 적극적으로 소비되는 활성 전구물질임을 확인하였다.

본 연구는 단일 권역 및 주 단위의 비교적 짧은 기간 측정에 기반하여 다른 지역으로의 일반화에는 한계가 있으며, 추후 다권역·장기 관측과 SIA 성분 조성 분석을 통해 보완될 필요가 있다. 그럼에도 본 연구 결과는 전북 권역 PM_{2.5} 저감 정책 수립의 직접적 근거 자료로 활용될 수 있다. 특히 본 연구에서 NH₃가 모든 배출원 유형에서 PM_{2.5} 형성에 적극적으로 소비되는 활성 전구물질로 작용함이 확인된 점은, NH₃ 농도가 압도적으로 높은 축산 부문을 우선적 관리 대상으로 설정하는 것이 지역 PM_{2.5} 농도 저감에 가장 효과적인 정책적 접근임을 시사한다. 즉, 광역 NH₃ 부하의 일차적 통제는 고배출 배출원에 대한 집중 저감을 통해 달성되어야 하며, 이는 동시에 인근 확산적·배경성 배출 지점에서의 PM_{2.5} 생성 잠재력을 함께 낮추는 광역 효과를 가져올 것으로 기대된다. 나아가 본 연구의 동시 실측 기반 분석 틀은 향후 다권역·장기 관측으로 확장되어 국가 차원의 NH₃-PM_{2.5} 통합 관리 체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 전북대학교 2026학년도 교육, 연구 및 학생지도비용(학술트랙)과 2026년도 전북녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 연구되었음(Project No. 26-JB-02).

References

Ahn, J.-B., Kim, H.-J. (2010) Characteristics of Monsoon Climate in

the Korean Peninsula, *Journal of Climate Research*, 5(2), 91-99, (in Korean with English abstract). <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART001462267>

Cho, E., Kang, Y., Cho, Y. (2022) Effects of Fine Particulate Matter on Cardiovascular Disease Morbidity: A Study on Seven Metropolitan Cities in South Korea, *International Journal of Public Health*, 67, 1604389. <https://doi.org/10.3389/ijph.2022.1604389>

Choi, J., Nirmalkar, J., Lee, K., Song, M. (2025) Reducing particulate NO₃⁻ of PM_{2.5} under an ammonia-rich environment: Role of NH₃ and aerosol pH using ISORROPIA-II model, *Atmospheric Environment*, 343, 120988. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120988>

Clean Air Policy Support System (CAPSS) (2023) National ammonia emissions in 2023. <https://www.air.go.kr/capss/emission/search.do?menuId=33> (accessed on May 7, 2026).

Foskinis, R., Gini, M.I., Kokkalis, P., Diapouli, E., Vratolis, S., Granakis, K., Zografou, O., Komppula, M., Vakkari, V., Nenes, A., Papayannis, A., Eleftheriadis, K. (2024) On the relation between the planetary boundary layer height and in situ surface observations of atmospheric aerosol pollutants during spring in an urban area, *Atmospheric Research*, 308, 107543. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107543>

Fu, X., Wang, S., Xing, J., Zhang, X., Wang, T., Hao, J. (2017) Increasing Ammonia Concentrations Reduce the Effectiveness of Particle Pollution Control Achieved via SO₂ and NO_x Emissions Reduction in East China, *Environmental Science & Technology Letters*, 4(6), 221-227. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00143>

Huang, R.-J., Zhang, Y., Bozzetti, C., Ho, K.-F., Cao, J.-J., Han, Y., Daelenbach, K.R., Slowik, J.G., Platt, S.M., Canonaco, F., Zotter, P., Wolf, R., Pieber, S.M., Bruns, E.A., Crippa, M., Ciarelli, G., Piazzalunga, A., Schwikowski, M., Abbazade, G., Schnelle-Kreis, J., Zimmermann, R., An, Z., Szidat, S., Baltensperger, U., Haddad, I.E., Prévôt, A.S.H. (2014) High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China, *Nature*, 514(7521), 218-222. <https://doi.org/10.1038/nature13774>

Jordan, C.E., Crawford, J.H., Beyersdorf, A.J., Eck, T.F., Halliday, H.S., Nault, B.A., Chang, L.-S., Park, J., Park, R., Lee, G., Kim, H., Ahn, J.-Y., Cho, S., Shin, H.J., Lee, J.H., Jung, J., Kim, D.-S., Lee, M., Lee, T., Whitehill, A., Szykman, J., Schueneman, M.K., Campuzano-Jost, P., Jimenez, J.L., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Anderson, B.E., Moore, R.H.,

- Ziemba, L.D., Fenn, M.A., Hair, J.W., Kuehn, R.E., Holz, R.E., Chen, G., Travis, K., Shook, M., Peterson, D.A., Lamb, K.D., Schwarz, J.P. (2020) Investigation of factors controlling PM_{2.5} variability across the South Korean Peninsula during KORUS-AQ, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8, 28. <https://doi.org/10.1525/elementa.424>
- Jung, D., Song, J., Kim, K., Kang, S., Kim, Y., Hong, S.-C., Lee, J.-B., Seo, S.-J., Lee, K., Park, J.-S., Song, M., Choi, N.R., Lee, T. (2026) Spatial and Seasonal Variation of Nitric Acid (HNO₃) and Understanding the Formation of NH₄NO₃ in the HNO₃-NH₃ system in Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 26(3), 19. <https://doi.org/10.1007/s44008-025-00090-2>
- Kim, D.-H., Kwon, M.-H., Cho, S.-J. (2024) A Study on the Agglomeration and Competitive Analysis of Major Industry in Jeonbuk State, *Journal of Korea Regional Economics*, 22(2), 41-67. <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART003109330>
- Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S. (2021) Sensitivity of fine particulate matter concentrations in South Korea to regional ammonia emissions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 273, 116428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116428>
- Kim, H.-G., Kang, Y.-H. (2012) The 2010 Wind Resource Map of the Korean Peninsular, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, 16(4), 167-172, (in Korean with English abstract). <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART001737444>
- Kim, M.-S., Koo, N., Kim, J.-G. (2020) A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study, *Korean Journal of Environmental Biology*, 38(1), 71-81, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.1.071>
- Korea Environment Institute (KEI) (2012) A Study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea I. <https://library.kei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/c9d59ace-4b52-435d-8b19-2008536b1439> (accessed on May 7, 2026).
- Lee, D., Kim, H.-C., Jeong, J.-H., Kim, B.-M., Lee, D., Choi, J.-Y., Song, M.-Y., Yoon, J.-H. (2022a) Relationship Between Synoptic Weather Pattern and Surface Particulate Matter (PM) Concentration During Winter And Spring Seasons over South Korea, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(24), e2022JD037517. <https://doi.org/10.1029/2022JD037517>
- Lee, H.-J., Jo, Y.-J., Kim, S., Kim, D., Kim, J.-M., Choi, D., Jo, H.-Y., Bak, J., Park, S.-Y., Jeon, W., Kim, C.-H. (2022b) Transboundary aerosol transport process and its impact on aerosol-radiation-cloud feedbacks in springtime over Northeast Asia, *Scientific Reports*, 12(1), 4870. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08854-1>
- Li, B., Ma, Y., Zhou, Y., Chai, E. (2023) Research progress of different components of PM_{2.5} and ischemic stroke, *Scientific Reports*, 13(1), 15965. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43119-5>
- Li, Y., Geng, Y., Hu, X., Yin, X. (2022) Seasonal differences in sources and formation processes of PM_{2.5} nitrate in an urban environment of North China, *Journal of Environmental Sciences*, 120, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.08.020>
- Lô, S., Dohmen, W., Heederik, D., Weijers, E., van Schothorst, I., Bleeker, A., Vermeulen, R., Hoek, G. (2025) Spatial and temporal variability of atmospheric ammonia using a dense network in an area with livestock, residential and natural environments intertwined, *Atmospheric Environment*, 360, 121394. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121394>
- Marais, E.A., Pandey, A.K., Van Damme, M., Clarisse, L., Coheur, P.-F., Shephard, M.W., Cady-Pereira, K.E., Misselbrook, T., Zhu, L., Luo, G., Yu, F. (2021) UK Ammonia Emissions Estimated with Satellite Observations and GEOS-Chem, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(18), e2021JD035237. <https://doi.org/10.1029/2021JD035237>
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (2025a) Livestock Distribution Status. <https://uni.agrix.go.kr/docs7/biOlap/fixType.do?reportId=report17> (accessed on May 7, 2026).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (2025b) Crop Cultivation Area. https://uni.agrix.go.kr/docs7/biOlap/fixType.do?reportId=eqpt_oudor_area (accessed on May 7, 2026).
- Nam, T.-C., Ryoo, J.-Y., Ryou, J.-W., Kim, H.-H., Park, J.-Y., Kang, H.-J., Kim, H.-Y., Kang, K.-S., Mun, D.-H., Choi, J.-H., Kim, H.-J. (2023) A Study on the Characteristics of PM_{2.5} and Estimation of Source Identification in Jeollabuk-do: Focused on Iksan City, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 985-1006, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.985>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) Annual Report of Air Quality in Korea. https://airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (accessed on May 7, 2026).

- 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>
- Petrus, M., Popa, C., Bratu, A.-M. (2022) Ammonia Concentration in Ambient Air in a Peri-Urban Area Using a Laser Photoacoustic Spectroscopy Detector, *Materials*, 15(9), 3182. <https://doi.org/10.3390/ma15093182>
- Pope, C.A., Lefler, J.S., Ezzati, M., Higbee, J.D., Marshall, J.D., Kim, S.-Y., Bechle, M., Gilliat, K.S., Vernon, S.E., Robinson, A.L., Burnett, R.T. (2019) Mortality Risk and Fine Particulate Air Pollution in a Large, Representative Cohort of US Adults, *Environmental Health Perspectives*, 127(7), 077007. <https://doi.org/10.1289/EHP4438>
- Ryu, Y.-H., Min, S.-K. (2024) Anthropogenic warming degrades spring air quality in Northeast Asia by enhancing atmospheric stability and transboundary transport, *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 50. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00603-7>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, USA.
- Shim, K., Kim, M.-H., Lee, H.-J., Nishizawa, T., Shimizu, A., Kobayashi, H., Kim, C.-H., Kim, S.-W. (2022) Exacerbation of PM_{2.5} concentration due to unpredictable weak Asian dust storm: A case study of an extraordinarily long-lasting spring haze episode in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 287, 119261. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119261>
- Skyllakou, K., Rivera, P.G., Dinkelaeker, B., Karnezi, E., Kioutsioukis, I., Hernandez, C., Adams, P.J., Pandis, S.N. (2021) Changes in PM_{2.5} concentrations and their sources in the US from 1990 to 2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(22), 17115-17132. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17115-2021>
- Song, W., Wang, Y.-L., Yang, W., Sun, X.-C., Tong, Y.-D., Wang, X.-M., Liu, C.-Q., Bai, Z.-P., Liu, X.-Y. (2019) Isotopic evaluation on relative contributions of major NO_x sources to nitrate of PM_{2.5} in Beijing, *Environmental Pollution*, 248, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.081>
- South Coast Air Quality Management District (South Coast AQMD) (2018) Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC) Field Evaluation HabitatMap Air Beam2 Sensor. <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6> (accessed on May 7, 2026).
- South Coast Air Quality Management District (South Coast AQMD) (2022a) Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC) Laboratory Evaluation HabitatMap AirBeam3. <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/habitatmap-airbeam3---laboratory-evaluation.pdf?sfvrsn=14> (accessed on May 7, 2026).
- South Coast Air Quality Management District (South Coast AQMD) (2022b) Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC) Field Evaluation HabitatMap AirBeam3. <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam3---field-evaluation.pdf?sfvrsn=10> (accessed on May 7, 2026).
- Tang, K., Zhang, H., Xu, G., Chang, F., Xu, Y., Miao, J., Cui, X., Jin, J., Li, B., Li, K., Liao, H., Li, N. (2025) Optimizing ammonia emissions for PM_{2.5} mitigation: environmental and health co-benefits in Eastern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(21), 14747-14762. <https://doi.org/10.5194/acp-25-14747-2025>
- Tao, J., Zhang, L., Cao, J., Zhang, R. (2017) A review of current knowledge concerning PM_{2.5} chemical composition, aerosol optical properties and their relationships across China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(15), 9485-9518. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9485-2017>
- Wang, Y.-L., Song, W., Yang, W., Sun, X.-C., Tong, Y.-D., Wang, X.-M., Liu, C.-Q., Bai, Z.-P., Liu, X.-Y. (2019) Influences of Atmospheric Pollution on the Contributions of Major Oxidation Pathways to PM_{2.5} Nitrate Formation in Beijing, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(7), 4174-4185. <https://doi.org/10.1029/2019JD030284>
- Wen, L., Xue, L., Wang, X., Xu, C., Chen, T., Yang, L., Wang, T., Zhang, Q., Wang, W. (2018) Summertime fine particulate nitrate pollution in the North China Plain: increasing trends, formation mechanisms and implications for control policy, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15), 11261-11275. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11261-2018>
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO global air quality guidelines. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content> (accessed on May 7, 2026).
- 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>
- Xie, Y., Wang, G., Wang, X., Chen, J., Chen, Y., Tang, G., Wang, L.,

- Ge, S., Xue, G., Wang, Y., Gao, J. (2020) Nitrate-dominated PM_{2.5} and elevation of particle pH observed in urban Beijing during the winter of 2017, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(8), 5019-5033. <https://doi.org/10.5194/acp-20-5019-2020>
- Yan, F., Chen, W., Wang, X., Jia, S., Mao, J., Cao, J., Chang, M. (2024) Significant Increase in Ammonia Emissions in China: Considering Nonagricultural Sectors Based on Isotopic Source Apportionment, *Environmental Science & Technology*, 58(5), 2423-2433. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07222>
- Yang, L., Li, C., Tang, X. (2020) The Impact of PM_{2.5} on the Host Defense of Respiratory System, *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8, 91. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00091>
- Yin, S., Huang, Z., Zheng, J., Huang, X., Chen, D., Tan, H. (2018) Characteristics of inorganic aerosol formation over ammonia-poor and ammonia-rich areas in the Pearl River Delta region, China, *Atmospheric Environment*, 177, 120-131. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.005>
- Zhang, Y., Liu, X., Zhang, L., Tang, A., Goulding, K., Collett Jr, J.L. (2021) Evolution of secondary inorganic aerosols amidst improving PM_{2.5} air quality in the North China plain, *Environmental Pollution*, 281, 117027. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117027>

Authors Information & Contributions

이현아(전북대학교 기후환경에너지융합학과 석사과정 학생, hyuna97@jbnu.ac.kr) Writing - original draft, Visualization

최민석(전북대학교 환경에너지융합학과 박사과정 학생, cms@jbnu.ac.kr) Formal analysis, Methodology

안영지(전북대학교 환경에너지융합학과 박사, anozi1649@jbnu.ac.kr) Validation

김용현(전북대학교 환경공학과 교수, 전북특별자치도 환경보건 센터 센터장, ykim84@jbnu.ac.kr) Conceptualization, Funding acquisition, Supervision, Writing - review & editing

Supplementary Materials

Table S1. Preparation of NH₄⁺ standard solutions for ion chromatographic (IC) calibration of atmospheric NH₃ concentrations.

A. NH₄⁺ primary standard solution

a. Product information		b. Certified concentration of each element	
Supplier	Highpuritystandards (HPS) USA	Element	μg mL ⁻¹
Product number	IC-4-100	Na	100 ± 1
Matrix	H ₂ O	NH ₄	100 ± 2
Purity	> 99%	Ca	100.0 ± 1
		K	100 ± 1
		Mg	100.0 ± 1

B. Preparation of NH₄⁺ calibration working standards

Standard ID	Target concentration (μg mL ⁻¹)	Mixing volume (mL)		Dilution ratio (v/v)
		PS	D.W. ^a	
Primary standard (PS)	100			
1st working standard (1st WS)	10	1.0	9.0	10% (1:9)
Final working standard (F-WS)		1st WS	D.W. ^a	
F-WS1	0.1	0.1	9.9	1% (1:99)
F-WS2	0.2	0.2	9.8	2% (1:49)
F-WS3	0.5	0.5	9.5	5% (1:19)
F-WS4	1.0	1.0	9.0	10% (1:9)
F-WS5	2.0	2.0	8.0	20% (1:4)

^aD.W.: Distilled Water

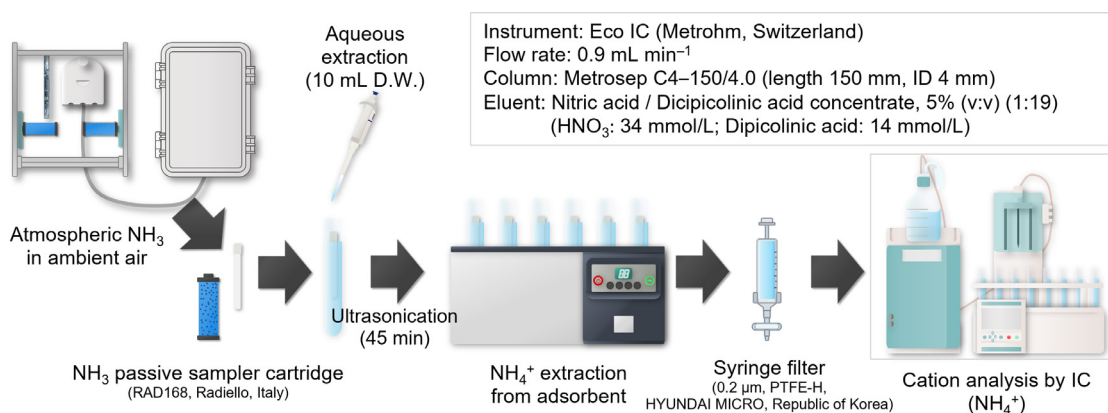


Fig. S1. Schematic diagram of the sample pretreatment and ion chromatographic (IC) analysis procedure for NH₃ passive samplers.

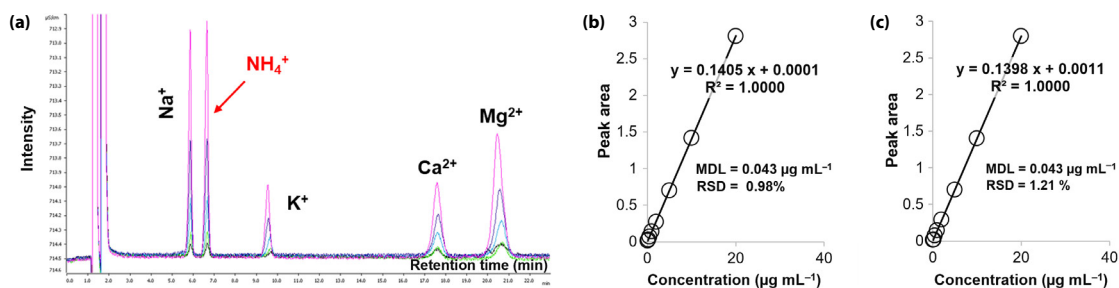


Fig. S2. IC analysis results of NH_4^+ calibration working standards (F-W51~F-W55). (a) representative chromatogram of five-point calibration standards (0.1, 0.2, 0.5, 1.0, and $2.0 \mu\text{g mL}^{-1}$), (b) calibration curve and QC results from the 1st analysis batch (2025-06-23), and (c) calibration curve and QC results from the 2nd analysis batch (2025-10-20).

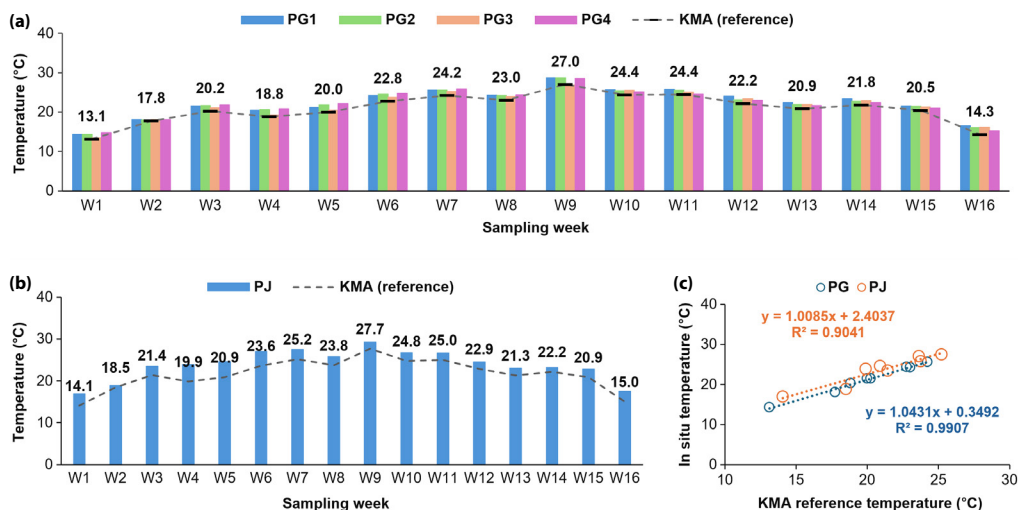


Fig. S3. Comparison of in situ measured temperatures at each sampling site with reference data from the Korea Meteorological Administration (KMA). (a) PG1~PG4: Gimje and (b) PJ: Jeonju, and (c) linear regression between in situ measured and KMA reference temperatures for PG and PJ sites.

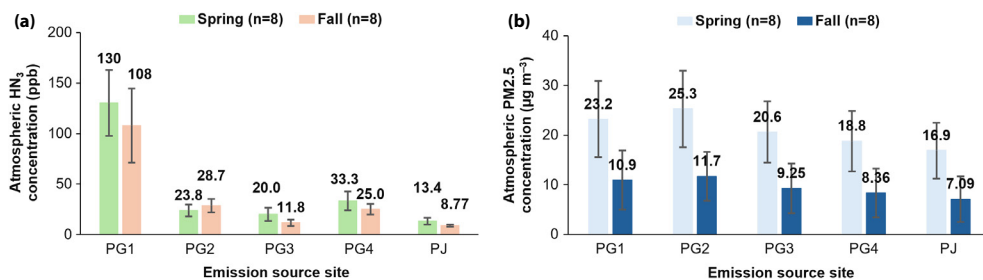


Fig. S4. Seasonal comparison of atmospheric NH_3 and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations by emission source site (spring vs. fall, $n = 8$ per season). (a) NH_3 and (b) $\text{PM}_{2.5}$.

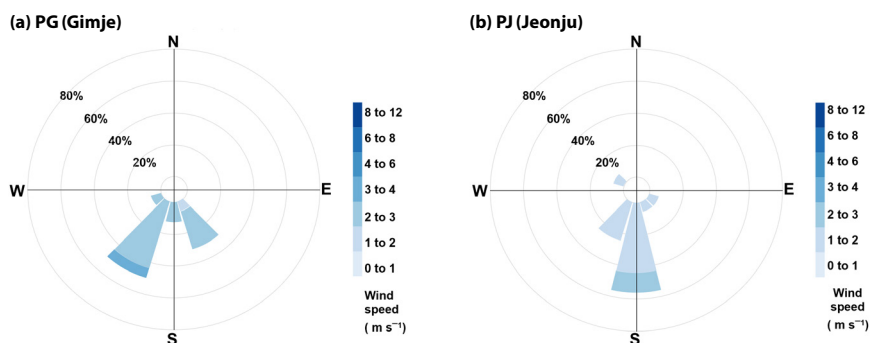


Fig. S5. Wind rose diagrams showing the prevailing wind direction and speed distribution at the two monitoring regions during the study period. (a) Gimje (PG sites) and (b) Jeonju (PJ site).

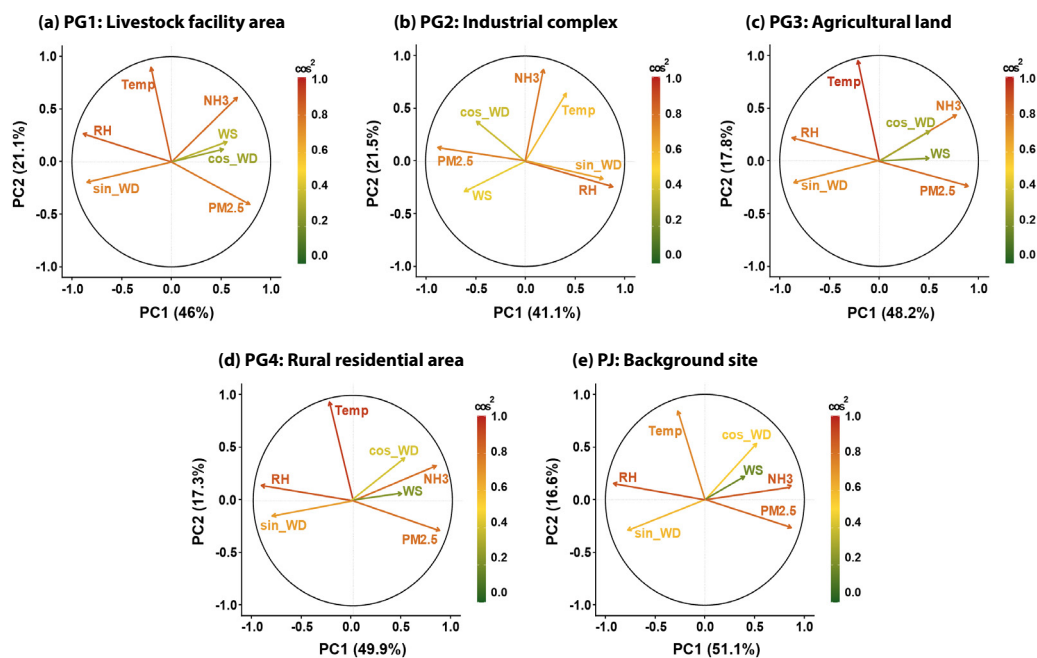


Fig. S6. Principal component analysis (PCA) biplots of atmospheric NH₃ and PM_{2.5} concentrations with meteorological variables at each emission source site. (a) PG1, (b) PG2, (c) PG3, (d) PG4, and (e) PJ. *COS²: color scale represents the squared cosine (cos²) indicating the quality of variable representation on the factor map.