

논문

2022년 가을철 충청남도 서산시 대기 중 HONO 분포 및 생성 특성 Characteristics of Atmospheric HONO at Seosan during Autumn 2022

최준혁¹⁾, 자안트 네르말카르²⁾, 길준수³⁾, 이광열⁴⁾, 송미정^{1),2),*}

¹⁾전북대학교 공과대학 환경에너지융합학과,

²⁾전북대학교 자연과학대학 지구환경과학과,

³⁾고려대학교 이과대학 지구환경과학과, ⁴⁾국립환경과학원 대기환경연구과

Joonhyeok Choi¹⁾, Jayant Nirmalkar²⁾, Junsu Gil³⁾,
Kwangyul Lee⁴⁾, Mijung Song^{1),2),*}

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

²⁾Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea

³⁾Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul, Republic of Korea

⁴⁾Division of Climate and Air Quality Research, Chungcheong Region Air Quality Research Center, National Institute of Environmental Research, Seosan, Republic of Korea

접수일 2025년 1월 17일

수정일 2025년 2월 14일

채택일 2025년 2월 14일

Received 17 January 2025

Revised 14 February 2025

Accepted 14 February 2025

*Corresponding author

Tel : +82-(0)63-270-3394

E-mail : mijung.song@jbnu.ac.kr

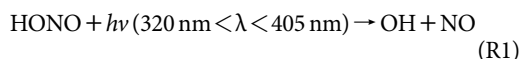
Abstract Nitrous acid (HONO) is a crucial component in atmospheric chemistry, serving as a major source of hydroxyl radicals and a precursor to ozone (O₃) formation, yet its formation mechanisms remain inadequately understood. This study examines the characteristics and formation mechanisms of HONO in a rural area of Seosan, South Korea, during autumn 2022. Real-time measurements revealed that the average HONO concentration was 0.34 ppb, with nighttime levels reaching ~0.42 ppb, which were higher than the daytime average of ~0.23 ppb. These concentrations are comparable to those observed in other rural areas, but significantly lower than urban regions like Seoul. Nighttime HONO formation was strongly influenced by heterogeneous reactions involving nitrogen dioxide (NO₂), relative humidity (RH), aerosol liquid water content (ALWC), and aerosol surface area (S_a). These findings underscore the critical role of heterogeneous processes in HONO production and its subsequent contribution to ozone formation in rural environments. The study highlights the need for further investigation into seasonal variations and the integration of HONO dynamics in air quality management strategies.

Key words: HONO, Heterogeneous reaction, Aerosol surface area and O₃

1. 서론

아질산(HONO)은 질소산화물(NO_x)의 반응을 통해 생성되며, 대기 중에서 약 30분 미만의 짧은 수명을 가진 가스상 물질이다(Seinfeld and Pandis, 2016). 대기 중 HONO는 자외선에 의해 광분해 되어 수산화 라디칼(OH radical)을 생성하는 주요 전구물질로, 농촌 및 도심지역을 포함한 다양한 환경에서 HONO의 광분해가 전체 OH 농도의 약 20~90%를 기여할 수 있

는 것으로 보고되었다(R1) (Zeng *et al.*, 2024; Cui *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017).



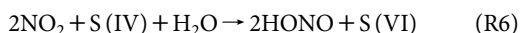
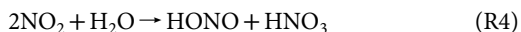
HONO의 광분해로 생성된 OH 라디칼은 대기 중 다양한 화학 반응에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 예를 들어, 대기 중에서 OH는 휘발성 유기화합물(VOCs)과 반응하여 오존(O₃)과 2차 유기입자(SOA:

secondary organic aerosol)를 형성한다. 또한 광화학 반응을 통해 탄화수소(HC)를 산화시켜 과산화에세틸 질산(PAN: peroxyacetyl nitrate)을 생성할 수 있다. 최근 이러한 2차 오염물질들은 인체 건강에 악영향을 미치고, 대기질을 악화시킬 수 있음이 보고되었다(Xuan *et al.*, 2023).

대기 중 HONO의 생성 메커니즘은 주간과 야간에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다. 주간에는 NO와 OH 간의 동질반응(R2: homogeneous reaction)과 NO₃⁻의 광화학 반응(R3)이 HONO의 주요 생성 경로로 나타난다(Seinfeld and Pandis, 2016).



반면, 야간에는 주로 NO₂와 에어로졸 물방울(H₂O) 간의 이질반응(heterogeneous reaction)을 통해 HONO가 생성된다(R4: Seinfeld and Pandis, 2016). 그러나, 이질반응을 통한 HONO의 생성 메커니즘과 이에 영향을 미치는 인자들은 아직 명확하게 규명되지 않았으며, 지역과 환경에 따라 생성 경로가 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어, 서울 도심지역에서는 야간 동안 암모니아(NH₃)와 입자 수분함량(ALWC: aerosol liquid water contents)의 증가가 HONO 생성을 촉진시킬 수 있는 것으로 보고되었다(R5) (Kim *et al.*, 2022). 또한, 중국 Zhengzhou의 산업지역에서는 SO₂와 NO₂의 산화-환원 반응이 이질반응에 상당한 기여를 하며(R6), 이 반응 과정에서 입자의 pH가 NO₂의 흡수(uptake)를 촉진하여 HONO 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 보고된 바 있다(Wang *et al.*, 2024).



이 외에도 HONO는 차량, 산업 공정, 연소 및 난방 등 배출원에서 직접 배출되기도 하며, 이는 대기 중 농도에 약 60%까지 기여할 수 있는 것으로 보고되었다

(Zeng *et al.*, 2024). 또한 일부 지역에서는 토양에 축적된 아질산염(NO₂⁻)에 의해 HONO가 생성되는 것이 확인되었다(Bhattacharai *et al.*, 2021).

대기 중 HONO는 지역과 계절에 따라 다르게 분포하는 경향을 보인다. 전반적으로 도심과 교외지역에서의 HONO 농도가 농촌지역에 비해 높은 수준을 나타냈다. 2021년 5월~2022년 12월 서울 도심지역에서 HONO의 농도는 약 1.0 ppb로 나타났으며(Gil *et al.*, 2023), 2022년 12월 동안 대전 도심지역에서 HONO의 농도는 약 0.7 ppb로 관측되었다(Kim *et al.*, 2024). 2016년 1~2월 동안 일본 도쿄 도심지역에서 관측된 HONO는 약 1.5 ppb로 나타났다(Nakashima *et al.*, 2017). 2003년 1~2월 네팔 카트만두 도심지역의 대기 중 HONO는 낮에는 0.4 ppb, 밤에는 1.7 ppb로 분포하였다(Yu *et al.*, 2009). 2018년 5~6월 동안 중국 Xi'an 교외지역의 대기 중 HONO 농도는 약 1.3 ppb로 관측되었다(Li *et al.*, 2021). 한편, 중국 2017년 2월과 7월 Yellow River Delta 농촌지역에서는 0.3 ppb로 다소 낮은 HONO 농도가 보고되었다(Gu *et al.*, 2020). 계절별로는 광분해가 활발한 여름철에 HONO의 농도가 낮게 나타나는 반면, 기온이 낮은 가을과 겨울철에 농도가 증가하는 경향이 여러 지역에서 보고되었다(Gil *et al.*, 2023; Gu *et al.*, 2020; Nakashima *et al.*, 2017). 그러나, 아직까지 대기 중 HONO의 지역적 및 계절적 농도 분포에 대한 연구는 제한적이며, 특히 HONO의 생성 메커니즘과 광화학 반응을 통한 대기 중 O₃ 형성에 미치는 영향은 여전히 이해가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 2022년 11월 10일부터 2022년 12월 10일까지 한 달 동안 서산시의 농업지역에서 HONO를 포함한 가스상 물질(O₃ 및 NO_x)을 측정하여, 실시간 자료 기반의 대기 중 HONO의 농도 특성을 파악하였다. 가을철은 일교차가 크고 기상 조건의 변화가 뚜렷하여, HONO의 일변화 경향성 및 시간대별 농도의 차이를 관찰하기에 적합한 계절이다. 이러한 계절적 특성을 통해 HONO 농도의 일변화 패턴을 분석하였으며, 선행 연구 자료를 바탕으로 배출원별 HONO의 농도 분포를 파악하였다. 최종적으로는 NO₂, 상대

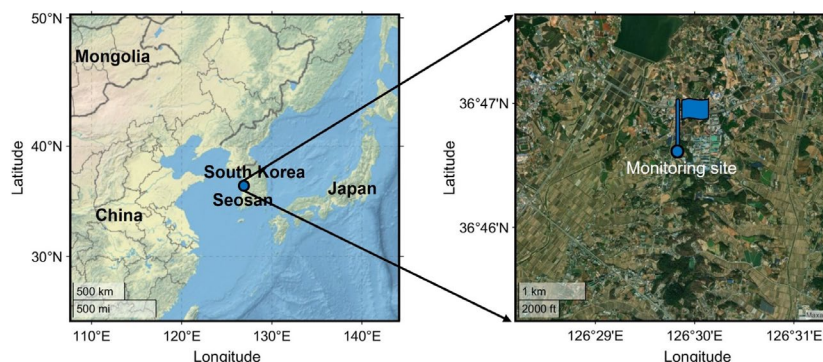


Fig. 1. Location of the monitoring site at Seosan.

습도, 입자 표면적 농도 (S_A : aerosol surface area concentration)와 같은 주요 요인이 농업지역 HONO 생성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 측정 장소

본 연구에 이용된 자료는 2022년 11월 10일부터 12월 10일까지 늦가을 동안 면적 약 739.2 km², 인구 약 180,000명의 서산시에 위치한 충청권 대기환경연구소 (126.494°E, 36.7769°N) 종합연구동 2층에서 관측되었다(그림 1). 측정 지점은 지상으로부터 약 7 m 높이에 위치하며, 측정소를 기준으로 북쪽 600 m 거리에 교통량이 많은 국도가 있다. 또한, 동쪽으로 약 700 m 거리에 소규모 농공산업단지가 있으며, 서쪽으로 3~5 km 이격된 거리로 서산시 도심지역(동문동)이 존재한다. 북서쪽 약 16 km 거리에는 해안가, 북쪽으로 약 26 km 거리에는 현대제철, 동부제철 등 대형 산업시설이 위치해 있다. 반경 2 km 내에는 대부분 농경지(밭, 논, 비닐하우스)가 밀집해 있으며, 전체 면적은 약 667.5 ha에 달한다(Gaikwad *et al.*, 2023). 이로 인해 충청권 대기환경연구소는 전형적인 농업지역의 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Nirmalkar *et al.*, 2023).

2.2 측정 방법

대기 중 HONO, HNO₃ 및 NH₃의 농도는 Monitor

for AeRosols and Gases in ambient Air (2060 MARGA, Metrohm, Switzerland) 시스템을 활용하여 1시간 간격으로 측정하였다. 이때 흡입되는 샘플의 흡착을 방지하기 위해 인렛은 PFA (Perfluoroalkoxy) 재질을 채택하였으며, 길이는 2 m 미만으로 최소화하여 사용했다. MARGA 시스템의 유량(flow rate)은 대기환경공정시험에 의거하여 16.7 LPM으로 설정하였으며, 분석부 내부의 습식회전디뉴더(Wet-Rotating Denuder)에서 가스상 물질들이 1시간 간격으로 포집되었다. 해당 가스상 물질은 액상 상태로 전환되어 이온 크로마토그래피를 통해 분석되었다. 음이온 성분은 3.6 mM Na₂CO₃와 10 μM KIO₃ 수용액을 이용해 Metrosep A Supp 7 column (2×150 mm, Metrohm, Switzerland)을 통해 분리하고, 양이온 성분은 4.0 mM의 수용액을 사용해 Metrosep C 6 column (2×150 mm, Metrohm, Switzerland)을 통해 분리하였다. 이온 성분의 정량은 LiBr internal standard (3680 μg/L Br⁻¹)을 활용하여 수행하였으며, 각 성분별 검출 한계(MDL: method detection limit)는 HONO 0.01 ppb, HNO₃ 0.02 ppb, NH₃ 0.07 ppb로 알려져 있다(Stieger *et al.*, 2018). 포집 효율의 경우, 전체 기간 동안 측정된 데이터 중 90%를 분석에 사용하였다.

PM_{2.5}의 질량농도(BAM-1020, Met One, USA)와 수용성 무기 성분(AIM, URG Corporation, USA) 8종(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺) 1시간 간격으로 측정하였다(Choi *et al.*, 2025). 에어로졸 입

경별 수농도는 scanning mobility particle sizer (SMPS: Model 3936, TSI, USA)를 통해 5분 간격으로 10~480 nm 크기 범위에서 관측하였다. 관측된 데이터를 식 1을 이용해 입자의 표면적 농도로 변환하여 1시간 간격으로 평균화한 데이터를 분석에 사용하였다(Kim *et al.*, 2024).

$$S_A = \int \pi D^2 n(D) dD \quad (1)$$

여기서 D 는 입자의 지름(범위: 20.2~461.4 nm), n 은 입경별 수농도(범위: 0.0~133220.9 particles/cm³)를 의미한다.

가스상 NO_x (NO + NO₂: 42iQ, Thermo scientific, USA)와 O₃ (49iQ, Thermo scientific, USA)는 각각 1분 간격으로 측정하였고, 1시간 간격으로 평균화하여 분석에 사용하였다. 기상 요소(기온, 상대습도, 태양 복사에너지)의 경우, 측정소와 동일한 위치에 있는 서산 기상대(126.494°E, 36.7769°N)의 1시간 간격 관측 자료를 기상자료개방포털에서 제공받아 분석에 활용하였다(Available at: <https://data.kma.go.kr>).

2.3 ISORROPIA-II 열역학적 평형모델

PM_{2.5}의 ALWC를 계산하기 위해 Na⁺-Cl⁻-K⁺-Na⁺-Mg²⁺-NH₄⁺-NO₃⁻-H₂O 시스템을 기반으로 한

열역학적 평형모델인 ISORROPIA-II version 2.1을 사용했다(Choi *et al.*, 2025; Fountoukis and Nenes, 2007). 모델의 입력자료로는 서산시 가을철에 측정된 PM_{2.5} 무기성분(SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Mg²⁺), total NO₃⁻ (TNO₃⁻: NO₃⁻ + HNO₃), total NH₃ (TNH₃: NH₄⁺ + NH₃) 및 기상 요소(상대습도, 기온)를 사용하였다. 모델 설정의 경우, 가스와 입자상을 모두 예측할 수 있는 Forward mode 및 모든 PM_{2.5} 입자가 조해되어 액체 상태로 존재하는 것을 가정하는 준안정 상태(metastable state)를 가정하였다. 본 연구에서는 유기물의 흡습성은 고려하지 않았으며, 무기물 조성에 따른 ALWC의 영향만을 계산하였다(Kim *et al.*, 2023).

3. 결과 및 고찰

3.1 2022년 가을철 서산시 HONO 농도 분포

2022년 11월부터 12월까지 서산 지역에서 측정된 1시간 평균 가스상 및 입자상 물질, 기상 자료를 이용하여 분석하였으며, 그 결과를 표 1과 그림 2에 나타내었다. 전체 기간 동안 HONO의 평균 농도는 0.34±0.28 ppb였으며, 농도의 범위는 0.01~1.25 ppb로 분포하였다. 서산사에서 측정된 HONO의 일별 최대 농도는

Table 1. Summary of gaseous species, PM_{2.5}, aerosol surface area concentration (SA), and meteorological parameters.

Species	Entire period	Clean O ₃ episode		Pollution O ₃ episode	
		Day	Night	Day	Night
HONO (ppb)	0.3±0.3	0.2±0.2	0.4±0.3	0.3±0.3	0.6±0.3
HNO ₃ (ppb)	0.3±0.3	0.4±0.4	0.2±0.1	0.8±0.5	0.3±0.2
NO (ppb)	1.9±6.3	3.0±9.3	1.1±3.3	3.6±7.6	1.0±3.2
NO ₂ (ppb)	9.6±7.3	7.3±6.6	10.3±7.2	9.1±7.1	13.2±7.7
O ₃ (ppb)	27.3±14.7	32.7±11.4	20.5±10.8	46.1±20.0	26.0±14.5
NH ₃ (ppb)	6.4±4.6	5.8±5.2	6.0±4.4	8.4±2.2	8.5±3.7
PM _{2.5} (μg/m ³)	29.2±22.6	20.9±15.8	26.4±17.8	37.2±23.5	57.6±29.8
Surface area (μm ² /cm ³)	259.6±149.9	200.8±125.0	273.8±146.6	237.3±141.8	381.2±148.0
ALWC (μg/m ³)	29.5±44.4	9.4±19.1	26.3±27.0	20.1±44.0	85.2±72.2
Temperature (°C)	7.0±6.5	8.7±6.6	4.1±5.6	14.8±4.1	8.0±3.5
Solar radiation (MJ/m ²)	0.8±0.6	0.9±0.6	0.0±0.0	1.2±0.6	0.0±0.0
Relative humidity (%)	70.0±19.0	56.7±16.6	78.0±14.5	14.8±4.1	86.6±8.1

Aerosol liquid water content (ALWC) was estimated using the ISORROPIA-II model. Pollution O₃ episodes are defined as periods with an 8-hour average O₃ concentration > 50 ppb, while clean O₃ episodes are defined as periods with an 8-hour average O₃ concentration ≤ 50 ppb based on standard of WHO (2005).

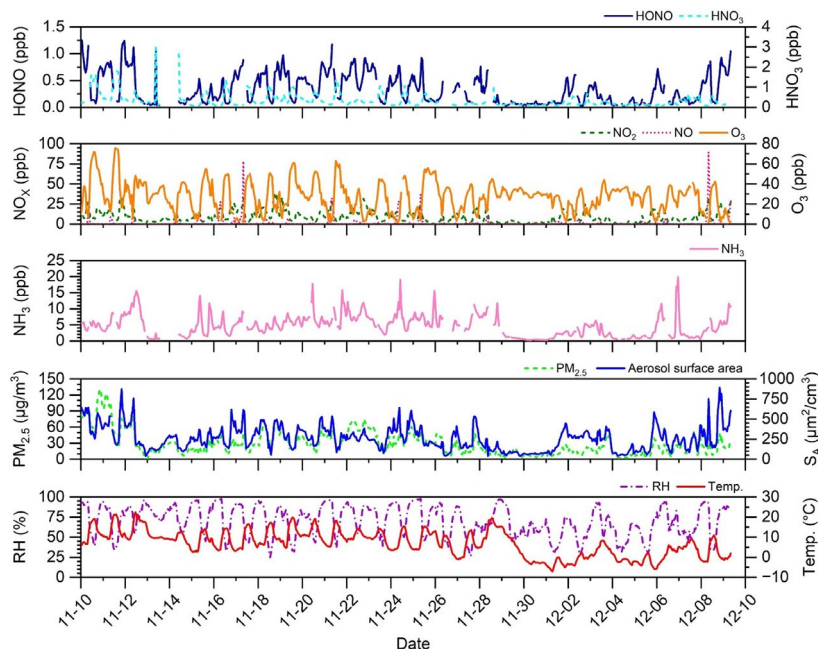


Fig. 2. Time series of hourly averaged concentrations of gaseous species (HONO, HNO₃, NO_x, and O₃), PM_{2.5}, aerosol surface area concentration (S_A), and meteorological parameters (relative humidity (RH) and temperature) measured in Seosan from November 10 to December 10, 2022.

2022년 11월 11일에 0.7 ppb로 나타났으며, 2022년 12월 4일에 0.07 ppb로 가장 낮은 농도가 관측되었다. 측정 기간 동안 대기 중 HONO 농도를 일출 및 일몰을 기준으로 구분하여 시간대별로 분석한 결과, 주간(08:00~17:00) 평균 농도는 0.23 ppb였고, 야간(18:00~07:00) 평균 농도는 0.42 ppb로, 주간보다 야간에 더 높은 농도를 보였다. NO₂는 0.3~37.0 ppb 농도 범위에서 평균 9.6 ± 7.3 ppb로 측정되었고, O₃는 1.4~75.9 ppb 범위에서 평균 27.3 ± 14.8 ppb로 관측되었다. PM_{2.5}의 경우, 농도는 1.0~131.0 µg/m³에서 변동하였으며, 평균 값은 29.2 ± 22.6 µg/m³으로, 이는 국내 PM_{2.5} 연평균 대기환경기준(PM_{2.5} ≤ 15 µg/m³)에 비해 약 2배 가까이 높은 수준으로 나타났다. 전체 측정기간 기온은 평균 7.0 ± 6.5 °C로 관측되었으며, 상대습도는 약 70.0 ± 19.0 %로 나타났다.

연구 기간 동안 서산시의 NO₂, S_A (그림 3a), HONO, O₃ (그림 3b)와 기온, 상대습도(그림 3c)의 일변화 경향성을 분석하였다. 그림 3a에 나타난 바와 같이, 측

정 지점의 하루 중 NO₂와 입자 표면적 농도는 뚜렷한 일변화를 보였다. NO₂와 입자의 표면적 농도 피크는 동일하게 오전 8시에 나타났으며, 각각 17.6 ppb, 362.8 µm²/cm³였다. NO₂와 표면적 농도는 밤부터 이른 오전까지 꾸준히 높은 수준을 유지하였다. 이러한 야간 농도 상승 현상은 일몰 이후 기온 감소와 대기 경계층(PBL: planetary boundary layer) 고도 하강에 의해 수반된 것으로 보여진다(Liu *et al.*, 2023). Gu *et al.* (2020), Li *et al.* (2012) 및 Zhang *et al.* (2022)은 농업지역에서 야간 동안 입자 표면적 농도의 증가가 NO₂의 이질 반응을 위한 활성 표면을 증가시켜 HONO 생성이 촉진될 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서도 NO₂와 에어로졸의 표면적 농도 사이에서 유사한 일변화 패턴이 관찰되었으며, 이는 야간 동안 높은 상대습도 조건에서 NO₂와 표면적 농도 간 이질반응이 농업지역의 HONO 생성에 영향을 미칠 수 있는 가능성을 제시하였다.

서산에서 오전 8시에 NO₂와 입자 표면적 농도의 피

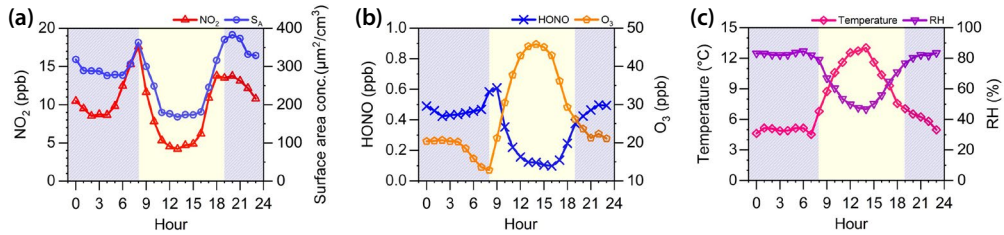


Fig. 3. Diurnal variation of (a) NO₂, aerosol surface area concentration (S_A), (b) HONO and O₃, and (c) temperature and relative humidity (RH) during nighttime (18:00~07:00, blue-shaded area) and daytime (08:00~17:00, yellow-shaded area).

크가 발생한 후, 오전 9시경에 HONO 농도가 약 0.6 ppb로 최고치를 기록하였다. 이후, 오전 10시부터 급격히 감소하여 오후 4시에는 0.1 ppb로 가장 낮은 수준을 보였다(그림 3b). 측정 기간 동안 대기 중 HONO의 농도는 야간에 상승하고, 주간에는 하강하는 패턴을 보였다. 여러 농업지역에서도 이러한 HONO의 주간 농도 경향성이 보고되었다(Gu *et al.*, 2020; Xue *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2012). HONO의 일변화 경향성은 상대습도 및 자외선의 수준과 밀접한 연관이 있다(Xuan *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2021). 상대습도가 높은 밤에는 에어로졸 표면에 수분층이 형성되어 NO₂와 H₂O 간의 이질반응이 활발해지며, 이는 HONO의 형성을 촉진할 수 있다(Xuan *et al.*, 2023). 반면, 기온이 높은 주간에는 자외선에 의해 HONO가 광분해되어 OH로 전환되면서 농도가 감소될 수 있다(Gu *et al.*, 2020). 서산에서 관측된 NO₂ 농도와 표면적 농도의 일변화는 HONO의 패턴과 일치하였으며, 이러한 결과는 야간 동안 표면적 농도가 NO₂와 수증기의 이질반응을 통해 대기 중 HONO 생성에 기여했을 것으로 추정된다. 그러나, 야간 HONO의 생성에는 다양한 메커니즘이 존재하기 때문에 후속 연구를 통해 다른 HONO 생성 경로의 상대적인 기여도를 좀 더 명확히 확인할 필요가 있다. 한편, O₃의 일변화는 HONO와 반대되는 경향을 보였으며, O₃은 오후 3시에 45.8 ppb로 최대 농도를 기록한 후, 다음날 일출 전까지 감소하여 오전 8시에 12.8 ppb로 최저 농도를 보였다. 이는 오후 중 HONO가 자외선에 의해 광분해되어 OH 라디칼을 생성하며, 생성된 OH 라디칼이 광화학 반응을 통해

O₃ 형성에 기여했음을 시사한다.

3.2 환경별 HONO 농도 분포

그림 4와 표 2는 국내외 다양한 배출원에서 관측된 대기 중 HONO 농도 분포를 나타낸다. 대기 중 HONO 농도는 총 19개의 도심지역에서 0.4~3.5 ppb 범위로 약 1.59 ppb(Kim *et al.*, 2024; Gil *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021; Cui *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017; Nakashima *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2016; Rappenglück *et al.*, 2013; Shon *et al.*, 2012; Elshorbany *et al.*, 2009; Qin *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2008; Shon *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2005), 총 7개의 농업지역에서는 0.2~0.7 ppb 범위에 약 0.36 ppb(Zeng *et al.*, 2024; Gu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2019; Reed *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2015; Shon *et al.*, 2007)로 관측되었으며, 도심지역이 농업지역에 비해 상대적으로 높은 농도를 보였다. 이러한 HONO 농도의 차이는 주로 도심지역에서의 고농도 NO₂에 기인한 것으로 판단된다. 도심지역에서는 NO₂의 주요 배출원인 차량 이동이 상당하며, 이로 인해 평균 NO₂ 농도는 약 27.7 ppb(범위: 13.4~56.2 ppb)로 나타났다. 반면, 농업지역에서는 NO₂의 농도가 약 10.2 ppb(4.6~18.0 ppb)로 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 이는 도심지역에서 상당한 수준의 NO_x가 배출됨에 따라, 농업지역에 비해 고농도의 HONO가 형성되었을 것으로 추정된다. 2022년 11월부터 12월까지 서산에서의 평균 HONO와 NO₂ 농도는 각각 약 0.34 ppb와 9.6 ppb로 관측되었다. 이는 대전, 서울, 베이징 등 NO₂ 농도가 높은 타 대도시

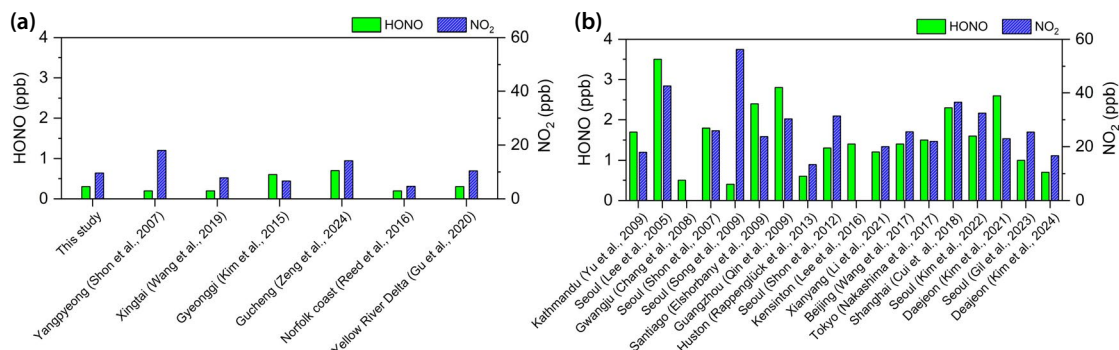


Fig. 4. Atmospheric HONO and NO₂ concentrations categorized by measurement characteristics: (a) rural and (b) urban areas.

Table 2. Comparison of atmospheric HONO and NO₂ concentrations at different locations.

Location	Type	HONO (ppb)	Reference
Seosan, S. Korea	Rural	0.3	This study
Yangpyeong, S. Korea	Rural	0.2	Shon <i>et al.</i> (2007)
Xingtai, China	Rural	0.2	Wang <i>et al.</i> (2019)
Gyeonggi, S. Korea	Rural	0.6	Kim <i>et al.</i> (2015)
Gucheng, China	Rural	0.7	Zeng <i>et al.</i> (2024)
Norfolk coast, UK	Rural	0.2	Reed <i>et al.</i> (2016)
Yellow River Delta, China	Rural	0.3	Gu <i>et al.</i> (2020)
Kathmandu, Nepal	Urban	1.7	Yu <i>et al.</i> (2009)
Seoul, S. Korea	Urban	3.5	Lee <i>et al.</i> (2005)
Gwangju, S. Korea	Urban	0.5	Chang <i>et al.</i> (2008)
Seoul, S. Korea	Urban	1.8	Shon <i>et al.</i> (2007)
Seoul, S. Korea	Urban	0.4	Song <i>et al.</i> (2009)
Santiago, Chile	Urban	2.4	Elshorbany <i>et al.</i> (2009)
Guangzhou, China	Urban	2.8	Qin <i>et al.</i> (2009)
Huston, USA	Urban	0.6	Rappenglück <i>et al.</i> (2013)
Seoul, S. Korea	Urban	1.3	Shon <i>et al.</i> (2012)
Kensington, UK	Urban	1.4	Lee <i>et al.</i> (2016)
Xianyang, China	Urban	1.2	Li <i>et al.</i> (2021)
Beijing, China	Urban	1.4	Wang <i>et al.</i> (2017)
Tokyo, Japan	Urban	1.5	Nakashima <i>et al.</i> (2017)
Shanghai, China	Urban	2.3	Cui <i>et al.</i> (2018)
Seoul, S. Korea	Urban	1.6	Kim <i>et al.</i> (2022)
Daejeon, S. Korea	Urban	2.6	Kim <i>et al.</i> (2021)
Seoul, S. Korea	Urban	1.0	Gil <i>et al.</i> (2023)
Daejeon, S. Korea	Urban	0.7	Kim <i>et al.</i> (2024)

지역의 HONO 농도와 비교했을 때 상대적으로 낮은 수준이다(Kim *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2022). 반면, 한국 양평, 영국 Norfolk coast, 중국 Yellow River Delta 및 Xingtai와 같은 농업지역에서는 서산과 유사한 HONO 농도 분포를 보였으며, 해당 지역의 NO₂ 농도

또한 서산과 비슷한 수준으로 관측되었다(Gu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2019). 이러한 결과는 대기 중 HONO 농도가 도심지역의 고농도 NO_x와 밀접하게 관련이 있음을 시사한다.

3.3 서산시 대기 중 HONO의 야간 생성 특성

서산지역의 야간 HONO 생성 특성을 파악하기 위해 HONO와 NO₂의 상관관계를 분석하였다(그림 5). 이를 위해 18:00에서 07:00까지 야간 시간 동안의 HONO 자료를 이용하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 야간 시간 동안 서산에서 대기 중 NO₂ 농도가 증가함에 따라 HONO 농도도 증가하는 것으로 나타났다($R=0.68$). 일반적으로 NO_x는 대부분 자동차에서 배출되는 것으로 알려져 있다. 반면, 농촌지역에서는 주로 농기계 사용으로 인해 배출될 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Kurvits and Marta, 1998). 또한, 선행 연구에 따르면, 가축 사료 저장 및 바이오매스 연소 등과 같은 농업 활동으로 배출되는 NO_x의 기여도가 상당히 높은 것으로 분석되었다(Zhao *et al.*, 2020; Hasson *et al.*, 2013). 이는 측정소 인근에서 이루어지는 축산 분뇨, 바이오매스 연소 등 농업활동에서 기원한 가스상 NO₂가 야간 HONO의 주요 전구물질로 작용한 것을 지시한다.

야간에는 상대습도가 높아지고, 높아진 상대습도는 입자의 수분함량을 증가시켜 NO₂의 이질반응이 좀 더 활발할 수 있는 환경을 제공하게 된다. 즉 이러한

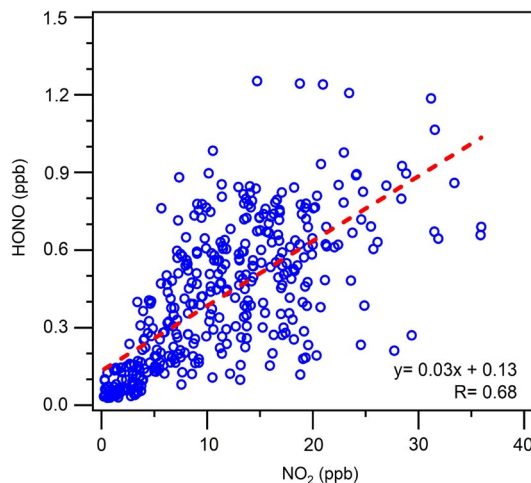


Fig. 5. Correlation between atmospheric HONO and NO₂ concentrations during nighttime (18:00~07:00).

환경은 이질반응을 통한 HONO의 생성을 촉진할 수 있다(Zhang *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2012). 서산에서 수분이 HONO 생성에 미치는 영향을 분석하기 위해 상대습도 및 ALWC에 따른 대기 중 HONO 농도와 HONO 및 NO₂의 비율(HONO/NO₂)을 그림 6에 제시하였다. 상대습도가 증가함에 따라 ALWC의 증가가 뚜렷하였고, 이때 HONO 농도가 급격히 상승하였다(그림 6a, c). HONO/NO₂ 비율 또한 상대습도 30~90%와 ALWC 1.0~60.0 µg/m³ 구간에서 증가하는 추세를 보였다(그림 6c, d). 야간 동안 관찰된 HONO와 ALWC 간의 높은 상관성은 농업지역에서 HONO가 차량 및 연소 과정에서의 직접 배출보다, 주로 수분을 매개로 한 NO₂의 이질반응을 통해 생성되었을 것으로 사료된다.

선행 연구에서는 건물, 토양, 식물 등 지표면(ground surface area) 및 입자의 표면적 농도(aerosol surface area concentration)가 NO₂와 수증기의 이질반응에 의한 HONO 생성의 활성 매개체로 보고되고 있다(Yu *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021). 그러나 어떠한 표면이 이질반응의 주요 매개체로 작용했는지에 대해서는 아직까지 명확히 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 상대습도, ALWC와 HONO의 농도가 증가함에 따라 입자의 표면적 농도가 상승하는 경향이 나타났다. 에어로졸 입자의 표면적 농도가 증가하면 입자 수분과 NO₂가 이질반응을 일으킬 수 있는 영역이 확장된다(Kim *et al.*, 2024). 이는 에어로졸 입자가 이질반응을 촉진하는 활성 표면으로 작용하여, 야간 HONO 형성에 중요한 영향을 미쳤다는 것을 의미한다. 또한, 이러한 이질반응은 R5와 R6에 명시된 바와 같이, 다양한 인자들의 영향을 받을 수 있는 것으로 보고되었기 때문에 이에 대한 HONO의 생성 경로를 고려하는 것이 필요하다. HONO와 NO₂, ALWC 및 표면적 농도의 높은 상관성을 보여준 서산 지역의 결과는 2022년 겨울철 서울과 대전의 도심지역에서 입자 표면적 농도와 HONO 간의 높은 상관성을 보고한 Kim *et al.* (2024)의 연구와 일치하였다.

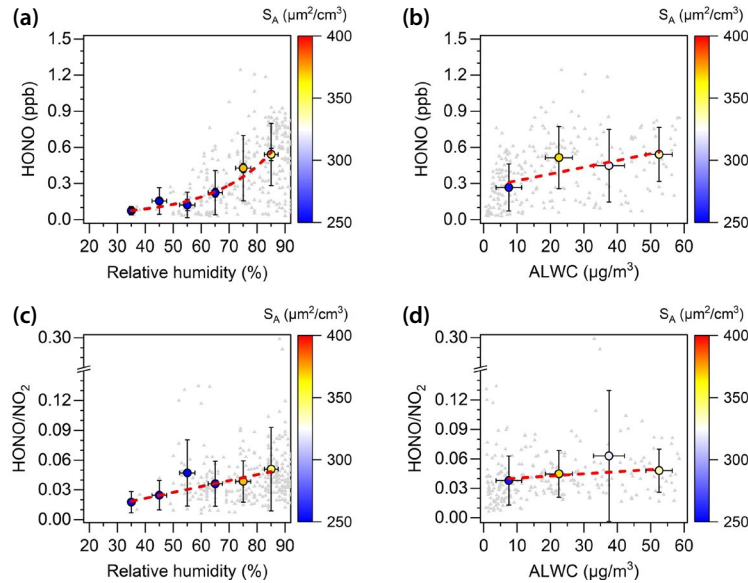


Fig. 6. (a) Relationships between HONO and relative humidity, (b) HONO and aerosol liquid water content (ALWC) estimated using the ISORROPIA-II model, and relationships between the HONO/NO₂ conversion ratio and (c) relative humidity and (d) ALWC during nighttime (18:00~07:00). The color scale represents the aerosol surface area concentration (S_A). Each data point represents the mean value within the corresponding bin, with error bars indicating the standard deviation.

4. 결 론

본 연구는 가을철 농촌지역의 HONO 농도 분포와 생성 특성을 파악하기 위해 2022년 11월 10일부터 2022년 12월 10일까지 충청남도 서산시에 위치한 충청권대기환경연구소에서 가스, 입자상 물질 및 기상 요소를 실시간으로 관측하였다. 연구 기간 동안 HONO의 평균 농도는 0.34 ppb로 나타났으며, 이는 다른 농업지역의 HONO 농도와 유사하지만, 도심지역에 비해서는 낮은 수치였다. 시간대별 분석 결과, HONO 농도는 주간보다 야간에 더 높게 나타났으며, NO₂ 표면적 농도 및 상대습도의 일변화와 유사한 경향을 보였다. 또한, 야간 동안 HONO와 ALWC, 입자 표면적 농도 간 높은 상관관계가 확인되었다. 이는 대기 중 HONO가 주로 NO₂와 수증기의 이질반응으로 생성되며, 이 과정에서 입자 표면적 농도가 중요한 역할을 한다는 것을 시사한다. 그러나 본 연구는 가을철 단일 계절에 대한 분석 결과만을 제시하였으므로, 복잡한

HONO의 생성 및 특성을 보다 정확히 이해하기 위해서는 향후 계절 및 환경별 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단-동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2020M3G1A1114548).

References

- Bhattacharai, H.R., Wanek, W., Siljanen, H.M.P., Ronkainen, J.G., Liimatainen, M., Hu, Y., Nykänen, H., Biasi, C., Maljanen, M. (2021) Denitrification is the major nitrous acid production pathway in boreal agricultural soils, *Communications Earth & Environment*, 2(1), 54. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00111-1>

- org/10.1038/s43247-021-00125-7
- Chang, W.-i., Choi, J.-H., Hong, S.-B. (2008) Simultaneous Measurements of Gaseous Nitrous Acid and Particulate Nitrite Using Diffusion Scrubber/Steam Chamber/Luminol Chemiluminescence, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 29(8), 1525-1532. <https://doi.org/10.5012/BKCS.2008.29.8.1525>
- Choi, J., Nirmalkar, J., Lee, K., Song, M. (2025) Reducing particulate NO_3^- of $\text{PM}_{2.5}$ under an ammonia-rich environment: Role of NH_3 and aerosol pH using ISORROPIA-II model, *Atmospheric Environment*, 343, 120988. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120988>
- Cui, L., Li, R., Zhang, Y., Meng, Y., Fu, H., Chen, J. (2018) An observational study of nitrous acid (HONO) in Shanghai, China: The aerosol impact on HONO formation during the haze episodes, *Science of The Total Environment*, 630, 1057-1070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.063>
- Elshorbany, Y.F., Kurtenbach, R., Wiesen, P., Lissi, E., Rubio, M., Vil-lena, G., Gramsch, E., Rickard, A.R., Pilling, M.J., Kleffmann, J. (2009) Oxidation capacity of the city air of Santiago, Chile, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(6), 2257-2273. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2257-2009>
- Fountoukis, C., Nenes, A. (2007) ISORROPIA II: a computationally efficient thermodynamic equilibrium model for K^+ - Ca^{2+} - Mg^{2+} - NH_4^+ - Na^+ - SO_4^{2-} - NO_3^- - Cl^- - H_2O aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(17), 4639-4659. <https://doi.org/10.5194/acp-7-4639-2007>
- Gaikwad, S., Kim, D., Jeong, R., Lee, J.Y., Lee, K., Ahn, J., Jang, K.-S., Kim, C., Song, M. (2023) Morphology and phase state of $\text{PM}_{2.5}$ in urban and coastal-rural areas during summer, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1142941>
- Gil, J., Lee, M., Lee, H., Jang, J. (2023) Seasonal Characteristics of HONO Variations in Seoul during 2021-2022, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 308-319, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.308>
- Gu, R., Zheng, P., Chen, T., Dong, C., Wang, Y.n., Liu, Y., Liu, Y., Luo, Y., Han, G., Wang, X., Zhou, X., Wang, T., Wang, W., Xue, L. (2020) Atmospheric nitrous acid (HONO) at a rural coastal site in North China: Seasonal variations and effects of biomass burning, *Atmospheric Environment*, 229, 117429. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117429>
- Hasson, A.S., Ogunjemiyo, S.O., Trabue, S., Ashkan, S., Scoggin, K., Steele, J., Olea, C., Middala, S., Vu, K., Scruggs, A., Addala, L.R., Nana, L. (2013) NO_x emissions from a Central California dairy, *Atmospheric Environment*, 70, 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.011>
- Kim, H., Park, J., Kim, S., Pawar, K.N., Song, M. (2023) 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, K., Lee, C., Han, S., Choi, D., Lee, S., Eom, J., Lee, S., Han, J. (2021) A Study on the Formation Reactions and Conversion Mechanisms of HONO in the Atmosphere, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 21(4), 233-241, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.33768/ksue.2021.21.4.233>
- Kim, N., Lee, H., Ok, S., Song, M., Lee, J., Ahn, J., Jung, J. (2024) Investigation of the Formation and Photolysis Characteristics of HONO and their Effect on O_3 Formation in the Daejeon and Seoul Atmosphere during Winter, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(3), 302-318, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.302>
- Kim, N.K., Kim, Y.P., Ghim, Y.S., Song, M.J., Kim, C.H., Jang, K.S., Lee, K.Y., Shin, H.J., Jung, J.S., Wu, Z., Matsuki, A., Tang, N., Sadanaga, Y., Kato, S., Natsagdorj, A., Tseren-Ochir, S., Baldorj, B., Song, C.K., Lee, J.Y. (2022) Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ chemical components during winter at five sites in Northeast Asia: High temporal resolution measurement study, *Atmospheric Environment*, 290, 119359. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119359>
- Kim, S., Kim, S.Y., Lee, M., Shim, H., Wolfe, G.M., Guenther, A.B., He, A., Hong, Y., Han, J. (2015) Impact of isoprene and HONO chemistry on ozone and OVOC formation in a semirural South Korean forest, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(8), 4357-4371. <https://doi.org/10.5194/acp-15-4357-2015>
- Kurvits, T., Marta, T. (1998) Agricultural NH_3 and NO_x emissions in Canada, *Environmental Pollution*, 102(1, Supplement 1), 187-194. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)80032-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)80032-8)
- Lee, C., Kim, Y.J., Hong, S.-B., Lee, H., Jung, J., Choi, Y.-J., Park, J., Kim, K.-H., Lee, J.-H., Chun, K.-J., Kim, H.-H. (2005) Measurement of Atmospheric Formaldehyde and Monoaromatic Hydrocarbons using Differential Optical Absorption Spectroscopy during Winter and Summer Intensive Periods in Seoul, Korea, *Water, Air, and Soil Pollution*, 166(1), 181-195. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-7308-6>
- Lee, J.D., Whalley, L.K., Heard, D.E., Stone, D., Dunmore, R.E., Ham-

- ilton, J.F., Young, D.E., Allan, J.D., Laufs, S., Kleffmann, J. (2016) Detailed budget analysis of HONO in central London reveals a missing daytime source, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(5), 2747-2764. <https://doi.org/10.5194/acp-16-2747-2016>
- Li, W., Tong, S., Cao, J., Su, H., Zhang, W., Wang, L., Jia, C., Zhang, X., Wang, Z., Chen, M., Ge, M. (2021) Comparative observation of atmospheric nitrous acid (HONO) in Xi'an and Xianyang located in the GuanZhong basin of western China, *Environmental Pollution*, 289, 117679. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117679>
- Li, X., Brauers, T., Häseler, R., Bohn, B., Fuchs, H., Hofzumahaus, A., Holland, F., Lou, S., Lu, K.D., Rohrer, F., Hu, M., Zeng, L.M., Zhang, Y.H., Garland, R.M., Su, H., Nowak, A., Wiedensohler, A., Takegawa, N., Shao, M., Wahner, A. (2012) Exploring the atmospheric chemistry of nitrous acid (HONO) at a rural site in Southern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(3), 1497-1513. <https://doi.org/10.5194/acp-12-1497-2012>
- 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>
- Nakashima, Y., Sadanaga, Y., Saito, S., Hoshi, J., Ueno, H. (2017) Contributions of vehicular emissions and secondary formation to nitrous acid concentrations in ambient urban air in Tokyo in the winter, *Science of The Total Environment*, 592, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.122>
- Nirmalkar, J., Lee, K., Ahn, J., Lee, J., Song, M. (2023) Comparisons of Spatial and Temporal Variations in PM_{2.5}-Bound Trace Elements in Urban and Rural Areas of South Korea, and Associated Potential Health Risks, *Atmosphere*, 14(4), 753. <https://doi.org/10.3390/atmos14040753>
- Qin, M., Xie, P., Su, H., Gu, J., Peng, F., Li, S., Zeng, L., Liu, J., Liu, W., Zhang, Y. (2009) An observational study of the HONO-NO₂ coupling at an urban site in Guangzhou City, South China, *Atmospheric Environment*, 43(36), 5731-5742. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.017>
- Rappenglück, B., Lubertino, G., Alvarez, S., Golovko, J., Czader, B., Ackermann, L. (2013) Radical precursors and related species from traffic as observed and modeled at an urban highway junction, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(11), 1270-1286. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.822438>
- Reed, C., Brumby, C.A., Crilley, L.R., Kramer, L.J., Bloss, W.J., Seakins, P.W., Lee, J.D., Carpenter, L.J. (2016) HONO measurement by differential photolysis, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(6), 2483-2495. <https://doi.org/10.5194/amt-9-2483-2016>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Shon, Z.-H., Kim, K.-H., Song, S.-K., Jung, K., Kim, N.-J., Lee, J.-B. (2012) Relationship between water-soluble ions in PM_{2.5} and their precursor gases in Seoul megacity, *Atmospheric Environment*, 59, 540-550. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.033>
- Shon, Z.H., Lee, G., Song, S.K., Lee, M., Han, J., Lee, D. (2007) Characteristics of reactive nitrogen compounds and other relevant trace gases in the atmosphere at urban and rural areas of Korea during May-June, 2004, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 58(3), 203-218. <https://doi.org/10.1007/s10874-007-9088-4>
- Song, C.H., Park, M.E., Lee, E.J., Lee, J.H., Lee, B.K., Lee, D.S., Kim, J., Han, J.S., Moon, K.J., Kondo, Y. (2009) Possible particulate nitrite formation and its atmospheric implications inferred from the observations in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 43(13), 2168-2173. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.018>
- Stieger, B., Spindler, G., Fahlbusch, B., Müller, K., Grüner, A., Poulain, L., Thöni, L., Seidler, E., Wallasch, M., Herrmann, H. (2018) Measurements of PM₁₀ ions and trace gases with the online system MARGA at the research station Melpitz in Germany - A five-year study, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 75(1), 33-70. <https://doi.org/10.1007/s10874-017-9361-0>
- Wang, J., Zhang, X., Guo, J., Wang, Z., Zhang, M. (2017) Observation of nitrous acid (HONO) in Beijing, China: Seasonal variation, nocturnal formation and daytime budget, *Science of The Total Environment*, 587-588, 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.159>
- Wang, M., Wang, S., Zhang, R., Shang, L., Zhang, Y. (2024) Notable effects of crustal matters on HONO formation by the redox reaction of NO₂ with SO₂ in an inland city of China, *Atmospheric Research*, 304, 107392. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107392>
- Wang, Y., Dörner, S., Donner, S., Böhne, S., De Smedt, I., Dickerson, R.R., Dong, Z., He, H., Li, Z., Li, Z., Li, D., Liu, D., Ren, X., Theys, N., Wang, Y., Wang, Y., Wang, Z., Xu, H., Xu, J., Wagner, T. (2019) Vertical profiles of NO₂, SO₂, HONO, HCHO, CHOCHO and aerosols derived from MAX-DOAS measurements at a rural site in the cen-

- tral western North China Plain and their relation to emission sources and effects of regional transport, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(8), 5417-5449. <https://doi.org/10.5194/acp-19-5417-2019>
- World Health Organization (WHO) (2005) WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf (accessed 12 Nov 2023).
- Xuan, H., Zhao, Y., Ma, Q., Chen, T., Liu, J., Wang, Y., Liu, C., Wang, Y., Liu, Y., Mu, Y., He, H. (2023) Formation mechanisms and atmospheric implications of summertime nitrous acid (HONO) during clean, ozone pollution and double high-level PM_{2.5} and O₃ pollution periods in Beijing, *Science of The Total Environment*, 857, 159538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159538>
- Xue, C., Zhang, C., Ye, C., Liu, P., Catoire, V., Krysztofiak, G., Chen, H., Ren, Y., Zhao, X., Wang, J., Zhang, F., Zhang, C., Zhang, J., An, J., Wang, T., Chen, J., Kleffmann, J., Melouki, A., Mu, Y. (2020) HONO Budget and Its Role in Nitrate Formation in the Rural North China Plain, *Environmental Science & Technology*, 54(18), 11048-11057. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01832>
- Yu, Y., Cheng, P., Li, H., Yang, W., Han, B., Song, W., Hu, W., Wang, X., Yuan, B., Shao, M., Huang, Z., Li, Z., Zheng, J., Wang, H., Yu, X. (2022) Budget of nitrous acid (HONO) at an urban site in the fall season of Guangzhou, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(13), 8951-8971. <https://doi.org/10.5194/acp-22-8951-2022>
- Yu, Y., Galle, B., Panday, A., Hodson, E., Prinn, R., Wang, S. (2009) Observations of high rates of NO₂-HONO conversion in the nocturnal atmospheric boundary layer in Kathmandu, Nepal, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17), 6401-6415. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6401-2009>
- Zeng, J., Xu, W., Kuang, Y., Xu, W., Liu, C., Zhang, G., Zhao, H., Ren, S., Zhou, G., Xu, X. (2024) The Impact of Agroecosystems on Nitrous Acid (HONO) Emissions during Spring and Autumn in the North China Plain, *Toxics*, 12(5), 331. <https://doi.org/10.3390/toxics12050331>
- Zhang, W., Tong, S., Jia, C., Ge, M., Ji, D., Zhang, C., Liu, P., Zhao, X., Mu, Y., Hu, B., Wang, L., Tang, G., Li, X., Li, W., Wang, Z. (2022) Effect of Different Combustion Processes on Atmospheric Nitrous Acid Formation Mechanisms: A Winter Comparative Observation in Urban, Suburban and Rural Areas of the North China Plain, *Environmental Science & Technology*, 56(8), 4828-4837. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07784>
- Zhao, Z.-Y., Cao, F., Fan, M.-Y., Zhang, W.-Q., Zhai, X.-Y., Wang, Q., Zhang, Y.-L. (2020) Coal and biomass burning as major emissions of NO_x in Northeast China: Implication from dual isotopes analysis of fine nitrate aerosols, *Atmospheric Environment*, 242, 117762. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117762>

Authors Information

- 최준혁 (전북대학교 환경에너지융합학과 석사과정)
(ck35061@jbnu.ac.kr)
- 자얀트 네르말카르 (전북대학교 지구환경과학과 연구교수)
(jayant@jbnu.ac.kr)
- 김준수 (고려대학교 지구환경과학과 연구교수)
(darkuncle@korea.ac.kr)
- 이광열 (국립환경과학원 환경연구사)
(kylee21@korea.kr)
- 송미정 (전북대학교 지구환경과학과 정교수)
(mijung.song@jbnu.ac.kr)