

논문

# 양돈 사육지역 대기 중 암모니아 농도 특성 연구

## Characteristic of Atmospheric Ammonia in Swine Breeding Area

장유나, 하태환<sup>1)\*</sup>, 송미정<sup>2)</sup>, 서시영<sup>1)</sup>, 정민웅<sup>1)</sup>, 권경석<sup>1)</sup>

전북지방환경청 환경관리과, <sup>1)</sup>국립축산과학원 축산환경과,

<sup>2)</sup>전북대학교 지구환경과학과

Yuna Jang, Taehwan Ha<sup>1)\*</sup>, Mijung Song<sup>2)</sup>, Siyoung Seo<sup>1)</sup>,  
Minwoong Jung<sup>1)</sup>, Kyeong-seok Kwon<sup>1)</sup>

Environment Management Division, Jeonbuk Regional Environment Office, Jeonju-si,  
Jeollabuk-do, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, Iseo-myeon,  
Jeollabuk-do, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Environmental and Energy, Jeonbuk National University, Jeonju-si, Republic of Korea

접수일 2021년 10월 26일

수정일 2021년 11월 16일

채택일 2021년 11월 18일

Received 26 October 2021

Revised 16 November 2021

Accepted 18 November 2021

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)63-238-7406

E-mail : thha54@korea.kr

**Abstract** In this study, the purpose is to collect basic data on the characteristics of NH<sub>3</sub> emission in domestic agricultural and livestock areas and the distribution of concentrations by season, monthly, and hourly. Representative regions where agriculture and livestock are developed were selected and the concentration of NH<sub>3</sub> and the meteorological environment were measured for one year in the atmosphere. As a result, the diurnal pattern of the two observation sites was clear. In both observation sites, it showed a diurnal trend that increased continuously from night to morning and decreased during the day. Also, in the case of Boryeong city (BR), although the diurnal trend of spring and autumn was not different, the highest concentration was high compared to other seasons relatively. This seems to be due to high concentration of NH<sub>3</sub> was observed in agricultural land of the spring and autumn seasons. It was found that in order to reduce the concentration of NH<sub>3</sub>, it is necessary to select an efficient management method through analysis.

**Key words:** Ammonia, Emission source, Real-time monitoring

### 1. 서론

염기성 가스상 물질인 암모니아(NH<sub>3</sub>)는 자연적 발생과 인위적 활동으로 대기 중으로 방출되며 인간과 생태계 전체에 영향을 미친다. NH<sub>3</sub>는 흡착성이 높은 강한 자극성 물질인 동시에 대기 중에서 질산(HNO<sub>3</sub>), 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 등의 산성 물질과 반응하여 암모늄(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)과 같은 2차 미세먼지를 생성하는 주요 전구 물질로 보고되고 있다(Holt *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Updyke *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2007; Stelson and Seinfeld, 1982). 이러한 2차 미세먼지는 호흡기 질환, 심혈관질환 등 인체에 악영향을 끼친다고 알려

져 있으며(Harrison *et al.*, 2012; Dockery, 2009; Radon *et al.*, 2001), 최근 연구 결과에 따르면 태아의 성장 발달까지도 영향을 미치는 것으로 보고하였다(Bhattacharai *et al.*, 2019).

국내 NH<sub>3</sub> 배출량은 2015~2017년 3년간 지속적으로 증가하는 추세로, NIER (2020)는 2015년 297 Gg, 2016년 301 Gg, 2017년 308 Gg이 배출되었다고 보고하였다. 2017년 농·축산업 부문의 기여도는 국내 NH<sub>3</sub> 총 배출량 중 79.3% (244 Gg)로 조사되어 가장 높은 비중을 차지하였다. 특히, 농·축산업 배출 부문에서는 축산업 유래 NH<sub>3</sub> 배출량이 약 93% (223 Gg) 비율로 축산업의 비중이 매우 높으며, 돼지 34.4%, 닭

17.8%, 소 17.5% 순으로 높은 수치를 나타내었다. 이처럼 축산 지역에서 발생 되는 NH<sub>3</sub>의 기여도가 적지 않음에도 불구하고 현재까지 국내 축산 지역 NH<sub>3</sub>의 농도 분포 및 특성에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 주변 환경에 따라 지역별로 다양하게 나타났다. 2019~2020년 전주시에서 측정된 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 10.5 ppb 수준으로 측정되었다 (Park *et al.*, 2020). 2010~2011년 서울 도심지역(광진구, 강서구)에서 측정된 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 평균 11~12 ppb 수준으로 나타났다 (Phan *et al.*, 2013). 2020년 6~12월 정읍시 축산지역에서 패시브 샘플러 (passive sampler)를 이용하여 측정된 결과, 19.9~161.1 ppb 범위 위로 나타났다 (Park *et al.*, 2021). 2018년 7~11월 16 곳의 양돈농가 부지 경계에서 약취공정시험기준 제 1 시험법 (붕산용액 흡수법)으로 측정된 NH<sub>3</sub> 농도는 140±100 ppb 수준으로 측정되었다 (Jang *et al.*, 2020). 2019년 양돈농가 배기구에서 광음향분광법 기반 실시간 측정 장치를 이용하여 모니터링한 결과, 4,190±2,910 ppb로 높은 수준을 나타내었다 (Jo *et al.*, 2020). 그러나 NH<sub>3</sub> 농도를 실시간으로 모니터링하지 않았거나 단기간 측정하였고, 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도를 대표하기 어려운 측정 장소에서 관측되었다. 또한, 현재까지 NH<sub>3</sub>은 국가대기 오염측정망 물질에 포함되어 있지 않아 농·축산지역에서의 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도, 특히 장기간 실시간 모니터링한 연구 결과는 거의 보고된 바 없다. 따라서, 본 연구에서는 농업과 축산업이 발달된 대표지역 두 곳을 선정하여 1년간 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도와 기상환경을 측정하여 계절별, 월별, 시간별 농도 분포의 특성 분석을 수행하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 모니터링 방법

본 연구는 충청남도 보령시(BR)와 충청남도 홍성군(HS)에서 각각 진행하였으며, 기간은 2020년 3월 1

일부터 2021년 2월 28일까지로 1년간 실시간으로 모니터링하였다. 모니터링 기간 중 8월과 9월의 경우 장마로 인하여 데이터의 불확도가 높아 제외 후 분석하였다. BR과 HS가 위치한 충청남도는 전국 기준 양돈농가가 가장 많은 지역이며, 한우농가와 육계농가는 전국에서 3번째로 많은 지역으로 농·축산업이 발달한 대표성이 있다(KOSTAT, 2020). BR의 경우 반경 1 km 이내 다수의 축사(15 농가)가 있으며, 특히 100 m 내 양돈농가가 매우 밀접하게 위치한다. 또한, BR 관측지점 기준 남쪽과 동쪽으로 농경지(논과 밭)가 위치한다. HS의 경우 반경 1 km 이내에 24개 양돈농가가 있고 특히 남쪽과 서쪽에 분포하고 있으며, 북쪽과 동쪽으로는 농경지가 위치한다(그림 1).

NH<sub>3</sub> 농도 측정은 Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) 방식의 측정기 (G2103, Picarro, Santa Clara, CA, USA)를 활용하였다. NH<sub>3</sub> 측정기와 유입구는 Teflon 튜빙 (PFA; Poly Fluoro Alkoxy)을 사용하여 연결하였으며, 총 길이는 약 4 m였다. 이때, 유입구에 추가적인 히터를 설치하지 않았다. 이론적으로, 측정기의 정확한 측정을 위해서는 내부 Cavity의 온도를 45°C로 유지해야 하며 (G2103 Analyzer Datasheet, Picarro), 본 연구의 측정 기간 동안 CRDS Cavity의 온도는 약 45.0±0.0°C로 유지되어 측정 결과를 신뢰할 수 있다고 판단하였다. NH<sub>3</sub> 측정은 실시간 초단위로 측정되었으나, 기상데이터와의 통합분석을 위하여 1시간 평균으로 환산하여 분석에 이용하였다.

NH<sub>3</sub> 측정기의 교정은 모니터링 기간 동안 각 측정지점에서 표준가스를 이용하여 진행하였다. 기기 교정을 위해 고순도 공기 (Rigas 99.999%, Daejeon, Korea) 및 암모니아 표준가스 (Rigas 25 µmol/mol, Daejeon, Korea)를 mass flow control (Brooks, 5850E, USA)를 이용하여 희석(10~500 ppb)해 총 3회 수행하였고, R<sup>2</sup> 값은 0.999 이상이였다. 기상측정(온도, 상대습도, 풍향, 기압)은 자동기상대 (MP650, THETA instruments)를 사용하여 1시간 간격으로 이루어졌으며 월별 자료 회수율은 90% 이상이였다.

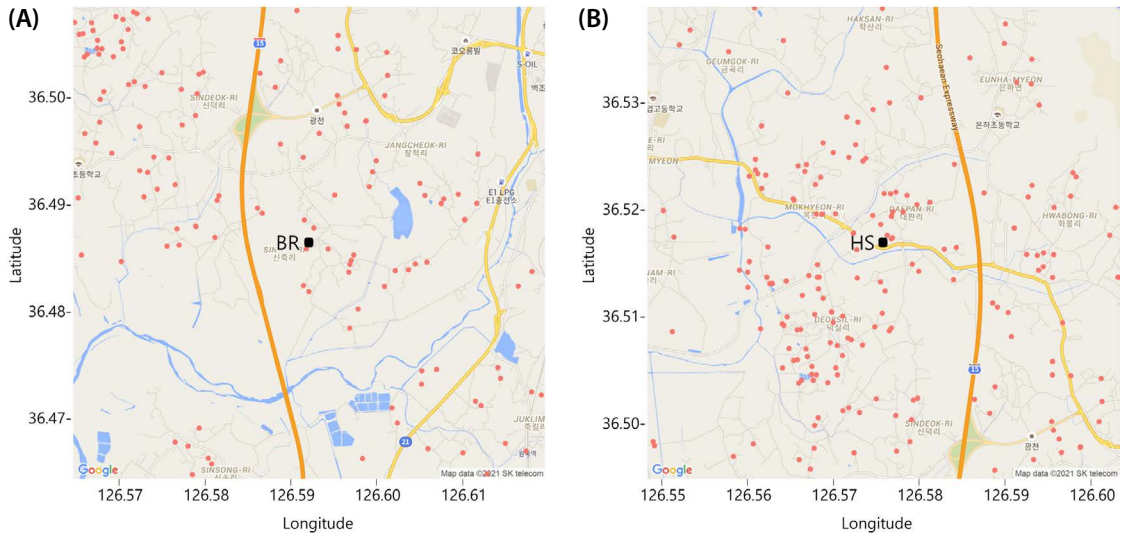


Fig. 1. Location of the monitoring station in BR (A) and HS (B). Black square: monitoring station, red dot: swine farm.

### 2.2 분석 결과의 통계 처리

관측된 NH<sub>3</sub> 농도와 기상환경에 대한 상관관계를 조사하기 위하여 통계 소프트웨어 Statistical Package for the Social Sciences (SPSS, version 12.0.1)를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 분석된 데이터에 Shapiro-Wilk test와 Kolmogorov-smimov를 시행하여 정규성 검정을 수행하였다 ( $p > 0.05$ ; 정규분포 가정). 모든 그룹은 비정규분포로 가정되었고, 따라서 비모수검정인 spearman's rank correlation method로 상관관계를 도출하였다 ( $p < 0.05$ ; 그룹 간 상관관계 있음).

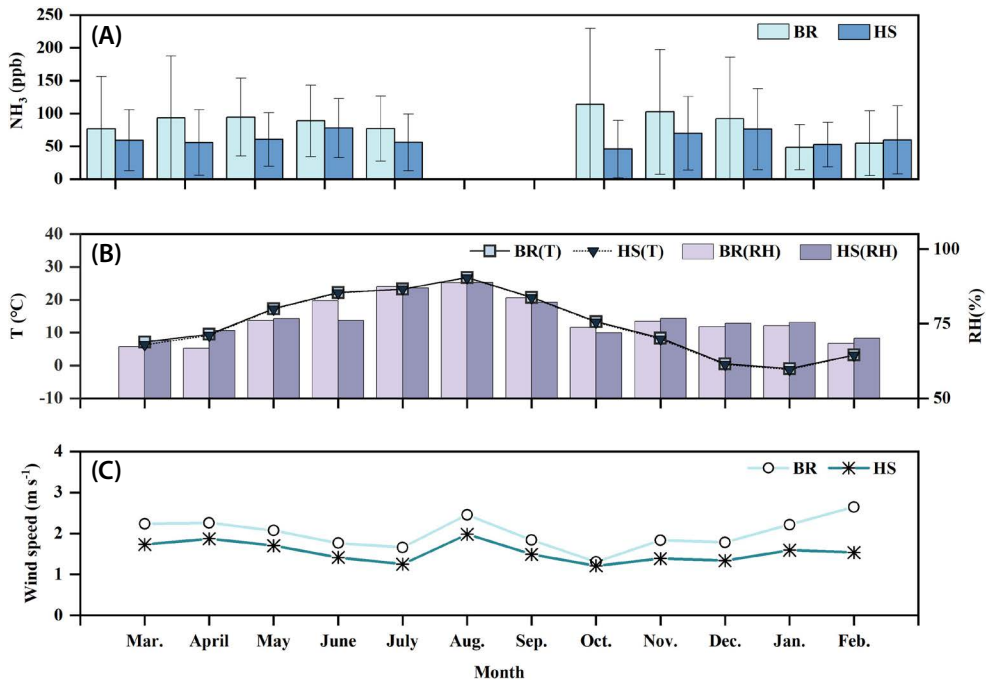
## 3. 결 과

### 3.1 월별 NH<sub>3</sub> 농도 분포 및 기상환경 변화

그림 2는 각 관측지점에서의 NH<sub>3</sub> 농도, 기온, 습도, 기압, 풍속의 월평균 값을 보여준다. 1년 동안 측정된 관측지역별 NH<sub>3</sub> 평균농도는 BR 85.3 ± 78.7 ppb, HS 62.9 ± 49.6 ppb로 BR의 NH<sub>3</sub> 농도가 상대적으로 고농도였으며, 두 지역의 평균농도는 74.1 ± 64.2 ppb로 분석되었다. 측정 기간 동안 두 지역의 월별 경향성은 뚜렷하게 나타났다. BR의 NH<sub>3</sub> 농도는 10월 (125.8

ppb) > 11월 (102.4 ppb) > 5월 (94.4 ppb) > 4월 (93.5 ppb) > 12월 (92.2 ppb) > 6월 (88.7 ppb) > 7월 (76.9 ppb) > 3월 (76.7 ppb) > 2월 (54.5 ppb) > 1월 (48.5 ppb) 순으로 높게 나타났다. 최고농도를 보인 10월과 최저농도를 보인 1월은 2.6배 이상의 농도 차이를 보였다. HS의 경우는 6월 (77.7 ppb) > 12월 (75.9 ppb) > 2월 (71.4 ppb) > 11월 (69.7 ppb) > 5월 (60.3 ppb) > 3월 (59.1 ppb) > 7월 (56.1 ppb) > 4월 (55.6 ppb) > 1월 (52.6 ppb) > 10월 (45.8 ppb) 순으로 높게 측정되었고, 최고농도를 보인 6월과 최저농도를 보인 10월은 1.5 배 정도의 농도 차이를 보였다. BR 농도 변화 범위가 상대적으로 크며, 최고 및 최저농도를 보인 각 월뿐만 아니라 월 경향성이 뚜렷하게 차이가 있어 그 원인 분석이 필요하다.

온도는 NH<sub>3</sub> 농도에 간접적으로 영향을 미쳐 기온이 상승하면 NH<sub>3</sub> 농도가 증가하는 것으로 알려져 있다 (Chang *et al.*, 2019; Meng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2015). HS의 경우 3~6월 기온이 상승함에 따라 NH<sub>3</sub>의 농도가 증가하는 것을 볼 수 있었지만, BR의 경우 3~5월 소폭 농도가 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 기온이 높아지는 7월에 BR과 HS 두 지역 모두 NH<sub>3</sub> 농도가 감소하였는데, 이는 강수로 인한



**Fig. 2.** Variations in monthly averages of measured ammonia concentrations (A) and meteorological parameters during the study period. T: temperature (B), Rh: relative humidity (B), and wind speed (C) for 2020 Mar~2021 Feb. Error bars correspond to the 1 $\sigma$  standard deviation around each mean.

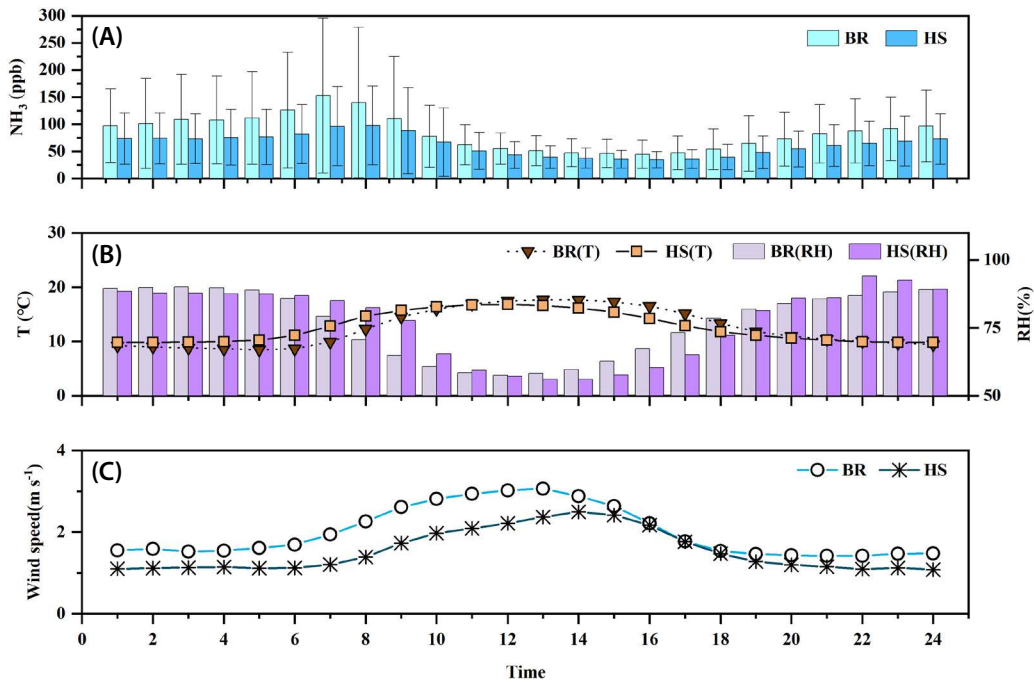
세정효과로 NH<sub>3</sub> 농도에 영향을 미친 것으로 보인다 (Wang *et al.*, 2015). 또한 10~11월 BR의 NH<sub>3</sub> 농도는 HS에 비해 약 2배 높은 농도를 보였는데, 이는 늦가을에 수확 후 발생한 농업부산물을 소각하는 노천소각 과정에서 일시적으로 NH<sub>3</sub>을 포함한 기체 및 입자상 대기오염물질이 다량 배출된 결과로 사료된다 (Hays *et al.*, 2005; Olivier *et al.*, 1998). 그러나 제한된 분석 인자 내에서의 해석으로 미세먼지 농도 및 화학적 특성 등의 추가적인 연구가 필요하다.

### 3.2 일변화 경향(NH<sub>3</sub> 및 기상환경)

연구 기간 동안 두 관측지역의 NH<sub>3</sub> 농도, 기온, 상대습도, 기압, 풍속의 일변화 경향을 그림 3에 도식화하였다. 관측지역별 기온은 BR 9.9~16.8°C, HS 8.5~17.7°C의 범위를 나타내었으며, 13시경에 최고온도, 새벽(24~5시) 시간에 최저온도를 유지하였다. 상대습도의 경우 BR 57.6~90.1%, HS 56.0~94.1% 범위로

측정되었으며, 기온과 반대로 13시경에 최저습도를 보였다. 반면에 최대습도 값은 BR 4시, HS 22시로 측정되었다. 풍속의 일변화는 BR 14~3.1 m·s<sup>-1</sup>, HS 1.1~2.5 m·s<sup>-1</sup>로 나타났으며 두 측정지역 모두 14시경에 최대풍속, 22~24시 사이에 최저풍속을 기록하였다. 기압의 경우 BR 1,014.2~1,015.9 hPa, HS 1,014.1~1,515.8 hPa로 일변화가 두드러지지 않고 두 관측지역이 유사하였다.

관측지역별 NH<sub>3</sub> 농도는 BR 44.6~154.2 ppb, HS 34.5~100.0 ppb로 측정되었다. 두 관측지의 NH<sub>3</sub>은 오전 7~8시 가장 높은 농도를 보였으며, 이후 농도가 낮아져 16시 가장 낮은 농도를 기록하였다. 전체적인 경향성은 밤부터 이른 오전까지 NH<sub>3</sub> 농도가 지속적으로 증가하다가 일출 이후 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 다양한 선행 연구에 따르면 일출 이후 기온 상승과 함께 대기경계층(planetary boundary layer)이 확장되고, 수직 혼합이 발생하여 NH<sub>3</sub>의 농도가 오후



**Fig. 3.** Diurnal variation of ammonia concentrations (A) and meteorological parameters during the study period. T: temperature (B), Rh: relative humidity (B), and wind speed (C) for 2020 Mar~2021 Feb. Error bars correspond to the 1 $\sigma$  standard deviation around each mean.

에 증가하는 것으로 보고되고 있다 (Shephard *et al.*, 2019; Dammers *et al.*, 2017; Wolff *et al.*, 2010). 그러나 본 연구에서는 반대되는 패턴으로 관측되었는데, Zöll *et al.* (2016)은 기계적 환기가 이루어지는 지속적인 배출원이 존재 시 밤 동안의 NH<sub>3</sub> 농도 축적에 의해 고농도를 야기할 수 있다고 보고하였다. 특히 BR 지역 인근 100 m 이내에 양돈농가가 위치하며, NH<sub>3</sub>이 지속적으로 배출되고 있어 이에 따른 영향으로 판단된다. 또한, Walker *et al.* (2006)과 Wolff *et al.* (2010)은 이른 아침 주변 농경지나 초지에서 대기 중으로 휘발된 고농도의 NH<sub>3</sub>을 관찰하여 본 관측지 주변에 농경지도 NH<sub>3</sub> 농도에 영향을 미친 것으로 보인다.

Table 2는 NH<sub>3</sub>와 주요 기상학적 성분의 상관관계 분석 결과이다. 분석 결과 두 관측지의 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 온도, 풍속과는 음의 상관성, 상대습도, 기압과는 양의 상관성을 가졌다. 온도 역전으로 인한 축적, 풍속에 의한 희석 등 기상환경은 NH<sub>3</sub> 농도와 직·간

**Table 1.** Correlation analysis of between hourly NH<sub>3</sub> concentration and meteorological parameters.

Parameter	T	RH	P	WS
NH <sub>3</sub> (BR)	-0.633**	0.752*	0.682*	-0.451**
NH <sub>3</sub> (HS)	-0.708**	0.610**	0.685**	-0.615**

T: indoor temperature, RH: relative humidity, P: pressure, WS: wind speed  
\*p < .05, \*\*p < .01

접적으로 연관되어 복합적으로 작용한다 (Zhao *et al.*, 2016). 이처럼 대기 중 NH<sub>3</sub>은 주변 배출원의 종류 및 환경, 기상요소 등 다양한 조건들에 의해 농도가 좌우되므로 농도 저감을 위해서는 정확한 원인 파악을 통하여 효율적인 관리 방법을 선택하여 접근하는 것이 필요함을 시사한다.

### 3.3 계절별 NH<sub>3</sub> 농도 분포와 일변화 경향

각 관측지에서 계절별 NH<sub>3</sub> 농도의 변화 특성을 분석하기 위해 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월),

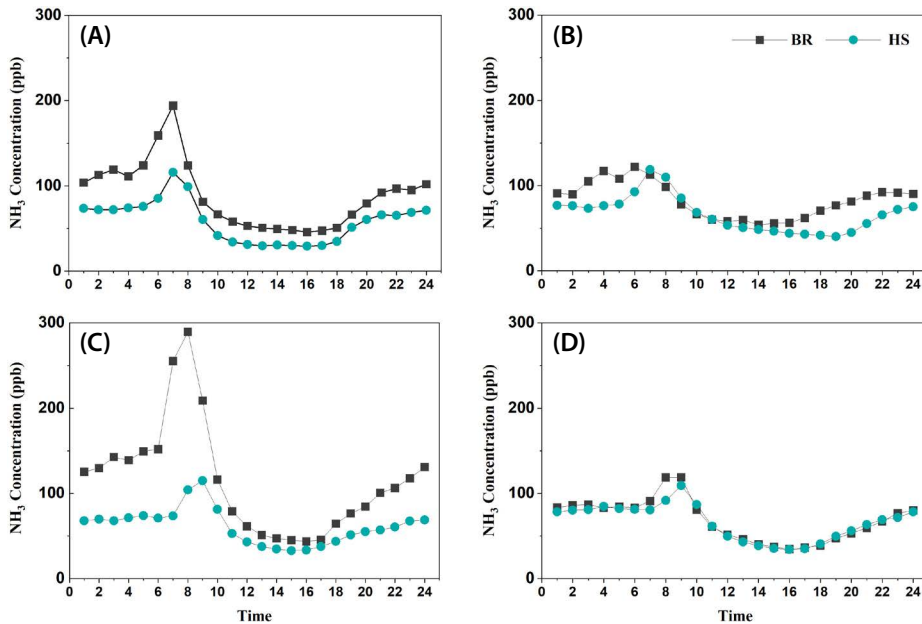


Fig. 4. Seasonal diurnal variations of  $\text{NH}_3$  in BR and HS. (A) spring, (B) summer, (C) autumn, (D) winter.

겨울(12~2월)로 정의하여 그림 4에 나타내었다. 계절별 분석 결과, BR의  $\text{NH}_3$  평균 농도는 가을(115.1 ppb) > 봄(88.7 ppb) > 여름(82.7 ppb) > 겨울(68.6 ppb) 순으로 높게 나타났으며, 가을과 겨울이 약 1.7 배의 농도 차이를 보였다. 반면 HS의 경우 여름(66.6 ppb) > 겨울(66.0 ppb) > 가을(61.3 ppb) > 봄(58.4 ppb) 순으로 높게 측정되었는데 계절별 차이가 BR에 비해 매우 작았다. 선행 연구에서는 국내 축사밀집지역의  $\text{NH}_3$  평균농도를  $72.7 \pm 73.6$  ppb로 보고하였으며 HS의 경우 유사하거나 약간 낮게 나타났고 BR의 경우 가을을 제외하고 유사하거나 약간 높았다(Park *et al.*, 2021).

각 계절의  $\text{NH}_3$  최고농도는 두 관측지 모두 7~10시 사이에 나타났으며, 일변화 경향 또한 매우 유사하였다. 일반적으로  $\text{NH}_3$ 은 여름철에 높은 농도를 보이는 것으로 보고되고 있으나(Xu *et al.*, 2019; Pan *et al.*, 2018), BR의 경우 봄, 가을의 일변화 경향은 같으나 최고농도가 다른 계절에 비해 상대적으로 높은 편으로 분석되었다. 이는 일정하게 고농도의  $\text{NH}_3$  배출이 일

어나는 축산 농가에서 기인된 것이 아닌 다른 배출원에 의한 것임을 시사한다. 추수 이후 늦가을 농촌에서 이루어지는 농업잔재물 및 생활 폐기물의 빈번한 소각과 농업활동이 활발한 봄철 시비된 비료에 포함된 질소성분이 토양의 수분함량에 따라  $\text{NH}_3$  형태로 대기 중으로 휘발된다(Liu *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016). 따라서 BR 지역도 이러한 영향으로 봄, 가을  $\text{NH}_3$  고농도 현상이 관측된 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 2020년 3월~2021년 2월 농·축산 지역인 BR과 HS 지역에서 대기 중  $\text{NH}_3$  농도 및 기상환경을 실시간으로 모니터링하였다. 관측기간 동안  $\text{NH}_3$  평균농도는 각각 BR 85.3 ppb, HS 62.9 ppb로 BR의  $\text{NH}_3$  농도가 상대적으로 고농도로 측정되었다. HS은 3~6월 기온이 상승함에 따라  $\text{NH}_3$ 의 농도가 증가하였고, BR의 경우 3~5월 소폭 농도가 증가하다가 감소

하는 것으로 나타났다. 또한 기온이 높아지는 7월에 BR과 HS 모두 NH<sub>3</sub> 농도가 감소하였는데, 이는 강수로 인한 세정효과로 인한 것으로 판단된다. 두 관측지의 일변화 경향은 뚜렷하게 나타났다. 두 관측지 모두 NH<sub>3</sub>은 7~8시 사이에 최고농도, 16시경에 최저농도를 기록하여 밤부터 오전까지 지속적으로 증가하다가 낮에는 감소하는 일변화 경향을 보였다. 이는 밤 동안 NH<sub>3</sub>의 축적과 이른 아침 농경지에서 휘발로 농도에 영향을 준 것으로 보인다. 주변 배출원 외에도 NH<sub>3</sub> 농도는 온도, 풍속과는 음의 상관성, 상대습도, 기압과는 양의 상관성을 나타내어, 농도 저감을 위해서는 복합적인 분석을 통해 효율적인 관리방안 선택이 필요할 것으로 나타났다.

각 관측지의 NH<sub>3</sub> 농도 변화 특성 분석 결과, BR의 NH<sub>3</sub> 평균 농도는 가을(115.1 ppb) > 봄(88.7 ppb) > 여름(82.7 ppb) > 겨울(68.6 ppb) 순으로 높게 나타났으며, 가을과 겨울이 약 1.7배의 농도 차이를 보였다. BR의 경우 봄, 가을의 일변화 경향은 같으나 최고농도가 다른 계절에 비해 상대적으로 고농도였으며, 이는 늦가을 농업 잔재물 및 생활 폐기물의 소각과 봄철 시비된 비료에서 휘발된 NH<sub>3</sub>의 영향으로 판단된다.

NH<sub>3</sub>은 간접 온실가스, 악취물질, 미세먼지 전구물질로 대기질에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 그러나 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도, 특히 장기간 실시간 모니터링 연구 결과는 거의 보고된 바 없다. 비록 1년간의 측정 자료로 농·축산지역의 NH<sub>3</sub> 농도의 특성을 일반화할 수 없지만, 본 연구 결과는 국내 농·축산지역의 NH<sub>3</sub> 배출 특성과 분포에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 앞으로 다양한 지역에서 장기간 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도 측정과 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ015291012021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## References

- Bhattarai, G., Lee, J., Kim, M., Ham, S., So, H., Oh, S., Sim, H., Lee, J., Song, M., Kook, S. (2019) Maternal exposure to fine particulate matter during pregnancy induces progressive senescence of hematopoietic stem cells under preferential impairment of the bone marrow microenvironment and aids development of myeloproliferative disease, *Leukemia*, 34, 1481-1484. <https://doi.org/10.1038/s41375-019-0665-8>
- Chang, Y., Zou, Z., Zhang, Y., Deng, C., Hu, J., Shi, Z., Dore, A.J., Collett, J.L. (2019) Assessing Contributions of Agricultural and Nonagricultural Emissions to Atmospheric Ammonia in a Chinese Megacity, *Environmental Science and Technology*, 53, 1822-1833. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05984>
- Dammers, E., Schaap, M., Haaima, M., Palm, M., Kruit, R.J.W., Volten, H., Hensen, A., Swart, D., Erisman, J.W. (2017) Measuring atmospheric ammonia with remote sensing campaign: Part 1-Characterisation of vertical ammonia concentration profile in the centre of The Netherlands, *Atmospheric Environment*, 169, 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.067>
- Dockery, D.W. (2009) Health Effects of Particulate Air Pollution, *Annals of Epidemiology*, 19(4), 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2009.01.018>
- Harrison, R.M., Laxen, D., Moorcroft, S., Laxen, K. (2012) Processes affecting concentrations of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in the UK atmosphere, *Atmospheric Environment*, 46, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.028>
- Hays, M.D., Fine, P.M., Geron, C.D., Kleeman, M.J., Gullett, B.K. (2005) Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions, *Atmospheric Environment*, 39(36), 6747-6764. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.072>
- Holt, J., Selin, N.E., Solomon, S. (2015) Changes in inorganic fine particulate matter sensitivities to precursors due to large-scale US emissions reductions, *Environmental Science and Technology*, 49(8), 4834-4841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00008>
- Jang, Y.N., Jo, G.G., Seo, S.Y., Jung, M.W. (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>
- Jo, G.G., Ha, T.H., Jang, Y.N., Hwang, O.H., Seo, S.Y., Woo, S.E., Lee, S.J., Kim, D.H., Jung, M.W. (2020) Ammonia Emission

- Characteristics of a Mechanically Ventilated Swine Finishing Facility in Korea, *Atmosphere*, 11(10), 1088. <https://doi.org/10.3390/atmos11101088>
- Kim, D.Y., Choi, M.-A., Han, Y.-H., Park, S.-K. (2016) A Study on Estimation of Air Pollutants Emission from Agricultural Waste Burning, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 167-175, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.2.167>
- Korea National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) 2017 Korea National Air Pollutants Emission, NIER-GP2018-131, <https://airemiss.nier.go.kr> (accessed on Sep. 30, 2021).
- Liu, L., Zhang, X., Xu, W., Liu, X., Lu, X., Wang, S., Zhang, W., Zhao, L. (2017) Ground ammonia concentrations over China derived from satellite and atmospheric transport modeling, *Remote Sensing*, 9(5), 467. <https://doi.org/10.3390/rs9050467>
- Meng, Z.Y., 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, 167-184. <https://doi.org/10.5194/acp-18-167-2018>
- Olivier, J.G.J., Bouwman, A.F., Van Der Hoek, K.W., Berdowski, J.J.M. (1998) Global air emission inventories for anthropogenic sources of NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O in 1990, *Environmental Pollution*, 102(1), 135-148. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)80026-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)80026-2)
- 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 and Technology*, 52(7), 3926-3934. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05235>
- Park, J.S., Oh, S.-M., Bae, M.-S., Lee, Y.-J., Chang, Y.W., Song, M.J. (2021) 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.
- 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>
- Radon, K., Weber, C., Iversen, M., Danuser, B., Pedersen, S., Nowak, D. (2001) Exposure assessment and lung function in pig and poultry farmers, *Occupational and Environmental Medicine*, 58, 405-410. <https://doi.org/10.1136/oem.58.6.405>
- Sharma, M., Kishore, S., Tripathi, S.N., Behera, S.N. (2007) Role of atmospheric ammonia in the formation of inorganic secondary particulate matter: A study at Kanpur, India, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 58, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10874-007-9074-x>
- Shephard, M.W., Dammers, E., Cady-Pereira, K.E., Kharol, S.K., Thompson, J., Gainariu-Matz, Y., Zhang, J., McLinden, C.A., Kovachik, A., Moran, M., Bittman, S., Sioris, C.E., Griffin, D., Alvarado, M.J., Lonsdale, C., Savic-Jovicic, V., Zheng, Q. (2019) Ammonia measurements from space with the Cross-track Infrared Sounder: characteristics and applications, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 2277-2302. <https://doi.org/10.5194/acp20-2277-2020>
- Statistics Korea (KOSTAT) (2020) Korean Statistical Information Service, <http://kosis.kr> (accessed on Sep. 30, 2021).
- Stelson, A.W., Seinfeld, J.H. (1982) Thermodynamic prediction of the water activity, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> dissociation constant, density and refractive index for the NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O system at 25°C, *Atmospheric Environment* (1967), 16(10), 2507-2514. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(82\)90142-1](https://doi.org/10.1016/0004-6981(82)90142-1)
- Updyke, K.M., Nguyen, T.B., Nizkorodov, S.A. (2012) Formation of brown carbon via reactions of ammonia with secondary organic aerosols from biogenic and anthropogenic precursors, *Atmospheric Environment*, 63, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.012>
- Walker, J.T., Robarge, W.P., Wu, Y., Meyers, T.P. (2006) Measurement of bi-directional ammonia fluxes over soybean using the modified Bowen-ratio technique, *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1-4), 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.011>
- 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, 15842. <https://doi.org/10.1038/srep15842>
- Wolff, V., Trebs, I., Ammann, C., Meixner, F.X. (2010) Aerodynamic gradient measurements of the NH<sub>3</sub>-HNO<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> triad using a wet chemical instrument: an analysis of precision requirements and flux errors, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 187-208. <https://doi.org/10.5194/amt-3-187-2010>



- Xu, Z., Liu, M., Zhang, M., Song, Y., Wang, S., Zhang, L., Xu, T., Wang, T., Yan, C., Zhou, T., Sun, Y., Pan, Y., Hu, M., Zheng, M., Zhu, T. (2019) High efficiency of livestock ammonia emission controls in alleviating particulate nitrate during a severe winter haze episode in northern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 5605-5613. <https://doi.org/10.5194/acp-195605-2019>
- Zhao, M., Wang, S., Tan, J., Hua, Y., Wu, D., Hao, J. (2016) Variation of Urban Atmospheric Ammonia Pollution and its Relation with PM<sub>2.5</sub> Chemical Property in Winter of Beijing, China, *Aerosol and Air Quality Research*, 16(6), 1378-1389. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0699>
- Zöll, U., Brummer, C., Schrader, F., Ammann, C., Ibrom, A., Flechard, C.R., Nelson, D.D., Zahniser, M., Kutsch, W.L.

(2016) Surface-atmosphere exchange of ammonia over peatland using QCL-based eddy-covariance measurements and inferential modelling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 11283-11299. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11283-2016>

## Authors Information

장유나 (전북지방환경청 환경관리과 환경연구사)  
하태환 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)  
송미정 (전북대학교 지구환경과학과 부교수)  
서시영 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)  
정민웅 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구관)  
권경석 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)