



논문

# 여름철 자연환기식 한우사 암모니아 배출 특성 연구

## A Study on Ammonia Emission Characteristics in Naturally Ventilated Hanwoo-barn

서시영<sup>†</sup>, 박준수<sup>†</sup>, 장유나<sup>1)</sup>, 하태환, 권경석, 정민웅\*  
국립축산과학원 축산환경과, <sup>1)</sup>전북지방환경청 환경관리과

Siyoung Seo<sup>†</sup>, Junsu Park<sup>†</sup>, Yuna Jang<sup>1)</sup>, Taehwan Ha, Kyeong-seok Kwon, Minwoong Jung\*

Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, Iseo-myeon, Jeollabuk-do, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Environment Management Division, Jeonbuk Regional Environment Office, Jeonju-si, Jeollabuk-do, Republic of Korea

접수일 2021년 11월 5일  
수정일 2021년 11월 22일  
채택일 2021년 11월 30일

Received 5 November 2021  
Revised 22 November 2021  
Accepted 30 November 2021

<sup>†</sup>These two authors contributed equally to this work as co-first authors.

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)63-238-7411  
E-mail : mwjung@korea.kr

**Abstract** Livestock production emit ammonia (NH<sub>3</sub>) from its manure, and ammonia is precursor of fine particle. In naturally ventilated barn, it has difficulties to measure its ventilation rate and NH<sub>3</sub> emission rate due to its characteristic of ventilation. To measure NH<sub>3</sub> emission rate, tracer gas method was used to calculate ventilation rate, and real-time NH<sub>3</sub> concentration was measured with Open Path-Tunable Diode Laser in naturally ventilated Hanwoo-barn. The mean NH<sub>3</sub> concentration of inside and outside was 2.03 ppm, 0.52 ppm respectively. NH<sub>3</sub> concentration was high when cattle was feeding due to increasing animal activity. NH<sub>3</sub> emission rate was calculated with NH<sub>3</sub>, tracer gas concentration and ventilation rate. NH<sub>3</sub> emission rate was 13.22~223.57 g · NH<sub>3</sub>/d · cow and average was 90.97 g · NH<sub>3</sub>/d · cow.

**Key words:** Ammonia, Emission, Naturally ventilated buildings, Tracer gas method, OP-TDL

### 1. 서 론

축산은 가축으로부터 발생하는 분과 노로 인해, 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 배출된다. 가축의 체내에서 소화되지 않은 사료 내 질소는 가축의 분뇨로 배설되며, 미생물이 이를 분해하는 과정에서 NH<sub>3</sub>가 발생한다 (Sommer *et al.*, 2004). NH<sub>3</sub>는 악취방지법상 지정악취물질이며, 대기 중 황산화물 (SO<sub>x</sub>), 질소산화물 (NO<sub>x</sub>)과 반응하여 2차 초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>)로 전환되는 전구물질로 작용한다 (Holt *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Updyke *et al.*, 2012). 국가 대기오염배출량 자료에 따르면, 2017년 국내 총 NH<sub>3</sub> 배출량은 308,298 ton이며, 농업 부문에서는 244,335 ton (79%)

이 배출되었다. 이 중 분뇨관리 부문은 226,582 ton (73%)으로, 대부분의 NH<sub>3</sub> 배출량이 축산에서 배출되며, 일반 소의 NH<sub>3</sub> 배출량은 분뇨관리 부문 중 14%를 차지하는 것으로 보고되었다 (NIER, 2019).

국내 한우(韓牛)사 유래 NH<sub>3</sub> 배출량 연구에 따르면, 주로 측정 물질의 플럭스(flux)를 측정하기 위해 챔버를 이용하여 실험하였다. Sa and Jeon (2010)은 Environmental Protection Agency (EPA)에서 제시하는 면오염원에서의 가스상 물질의 플럭스를 측정하는 방법으로 Dynamic Flux Chamber를 활용하여 우사의 NH<sub>3</sub> 플럭스를 측정하였으며, Lee *et al.* (2013)은 실험실 단위에서 밀폐형 챔버법을 사용하여 NH<sub>3</sub> 휘산량을 측정하였다. 앞선 두 연구 모두 챔버를 사용

하여 면오염원의 NH<sub>3</sub> 발생량을 측정하였으나, 측사에서 실제 환기량을 적용하지 않고, 실시간 측정을 반영하지 못한 한계점이 있다.

뚜렷한 점 오염원인 강제환기식 축사의 경우, 측사 시설에서 배기팬을 통해 배출되는 NH<sub>3</sub> 농도와 환기량을 활용하여 NH<sub>3</sub> 배출량을 산정한다 (Jo *et al.*, 2020). 반면, 자연환기식 축사의 NH<sub>3</sub> 배출량은 풍환경, 온도, 입기방향 등 외부 환경요인에 영향을 받기 때문에, 강제환기식과는 다른 방법을 사용하여야 한다 (Edouard *et al.*, 2016).

또한, 우사 내 NH<sub>3</sub> 농도 측정은 주로 전기화학식 센서 (Park *et al.*, 2015), 광음향분광법 측정장치 (Zhang *et al.*, 2005)가 이용되고 있으나, 측정시, 전기화학식 센서는 감도가 낮고, 광음향분광법은 점오염원에 대한 측정만 가능하다는 한계가 있어 우사 측정에 적용하기 어렵다. 반면, Open Path-Tunable Diode Laser (OP-TDL)는 질소산화물 (NO<sub>x</sub>), 휘발성 유기화합물 (VOCs), 온실가스 등 원거리 경로의 가스상 물질의 농도 모니터링이 가능한 장비로 면오염원에서의 농도 측정이 가능하며 (Bailey *et al.*, 2017; Somesfalean *et al.*, 2005; Thoma *et al.*, 2005), 농경지 및 축사와 같은 넓은 범위의 배출원에서의 측정 장비로 적합한 것으로 알려져 있다 (DeBruyn *et al.*, 2020; Webster *et al.*, 2015; McGinn *et al.*, 2006). 따라서 본 연구에서는 면오염원의 특성을 반영하여 측정할 수 있는 OP-TDL을 활용하여 자연환기식 한우사에서의 NH<sub>3</sub> 배출특성을 평가하고 최종적으로 NH<sub>3</sub> 배출량을 도출하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 한우사 구조 및 사육 환경

본 연구는 전북 김제 소재의 4면이 개방되어 있는 자연환기식 한우사에서 2021년 7월 1일에서 8월 17일 기간 내에 16일간 수행되었다. 국내 한우농가는 약 71%가 자연환기식 축사를 사용하고 있지만 (Kostat, 2021), 국내 자연환기식 축사의 NH<sub>3</sub> 배출량 측정에 관한 공인된 방법론이 없어, 유럽에서 공인된 측정법인 Verification of Environmental Technologies for Agricultural production (VERA) 테스트 프로토콜을 참고하였다. VERA 테스트 프로토콜 중, 한우사와 사육 환경이 유사한 유우사 기준을 참고하여 농장을 선정하였다 (표 1). 선정된 한우사의 면적은 총 1,500 m<sup>2</sup>로, 중앙 복도를 중심으로 양쪽에 각각 10 m × 5 m의 우방이 15개씩 있는 구조이다 (그림 1). 우방 내 깔짚은 갈판을 사용하였으며, 측정기간 이전인 2021년 3월 1일에 교체하였다. 측정기간 동안 한우사육 두수는 총 152 두 (육성우 32 두, 비육우 49 두, 번식우 46 두, 송아지 25 두)를 사육하였으며, 축산법에서 제시하는 축산업허가기준 (비육우: 7 m<sup>2</sup>/두, 송아지: 5.2 m<sup>2</sup>/두, 번식우: 10 m<sup>2</sup>/두)과 VERA 프로토콜에서 제시한 '사육면적 70% 이상 가축 사육'을 충족하면서 진행하였다.

### 2.2 NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> 농도 측정

본 연구에서는 OP-TDL (GasFinder3-OP, Boreal, Canada)을 이용하여 실시간 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하였다. OP-TDL은 송신부와 수신부로 구성되어 있으며,

**Table 1.** Requirements for dairy cows test (VERA test protocol) and Hanwoo beef.

Criterion	Dairy cows (VERA)	Hanwoo-beef (In this study)
Herd composition	>70% of the available barn area must be distributed to cows	71% of the available barn area distributed to cows
Minimum number of animals in the test compartment	30 cows (milking + dry)	152 cows
Minimum duration of Housing system in use	More than 2 months	4 months
Weight range (kg)	-	421.25 kg
Size of barn	-	1,500 m <sup>2</sup>

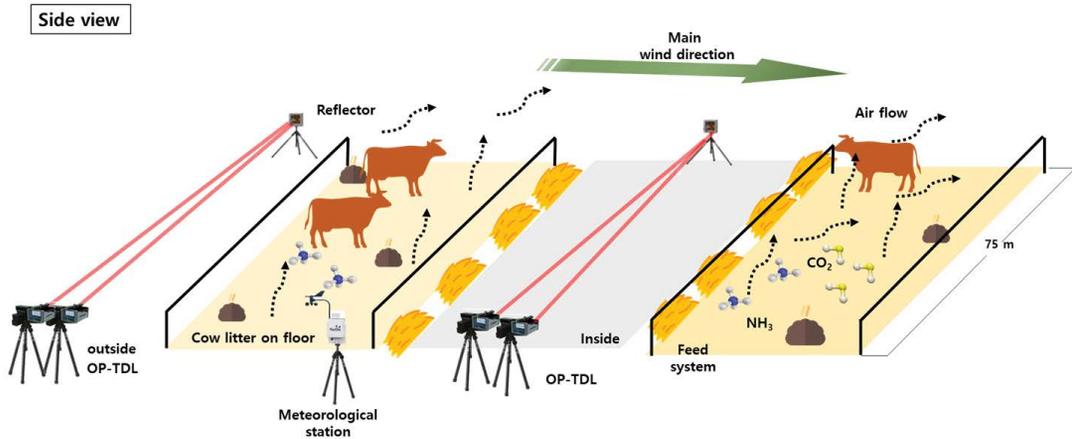


Fig. 1. Scheme of naturally ventilated hanwoo barn and ammonia measurement positions.

송신부에서 측정하고자 하는 물질의 특정 파장을 지닌 Infrared Ray (IR)을 방출한다. 방출된 IR은 반사판으로부터 반사되어 다시 송신부에 부착된 검출기로 수집되며, 이때 반사된 빛의 강도 중 일부를 정량하여 경로상의 물질의 농도를 계산한다. 한우사 내부 NH<sub>3</sub> 농도 측정을 위해 축사 전체 농도를 대변하도록 축사 중앙 복도 양 끝에 송/수신기와 반사판을 설치하였으며, 배경농도 측정을 위해 축사에서 5 m 이격된 거리의 외부 입기방향에 송/수신기와 반사판을 설치하여 측정하였다(그림 1). 배경농도 측정 위치를 선정하기 위해 측정 전 축사 외부에 간이 기상대를 설치하여 3일간 풍환경을 측정하고 주풍향(서남풍)을 고려하여, 측정 위치를 최종적으로 선정하였다. NH<sub>3</sub> 농도 측정은 총 16일간 초단위로 측정하여, 최종 1시간 평균을 결과에 사용하였으며, 우천 시 데이터는 제외하고 분석하였다.

또한, 측정기간 자연환기식 축사의 환기량 추정을 위해 CO<sub>2</sub>를 OP-TDL을 사용하여 측정하였다. CO<sub>2</sub> 측정은 NH<sub>3</sub> 측정과 동일하게 NH<sub>3</sub> 측정용 OP-TDL 측면에서 NH<sub>3</sub> 측정과 같은 반사판을 초점으로 두고 측정하였다(그림 1). CO<sub>2</sub> 농도 모니터링은 NH<sub>3</sub> 농도 측정과 마찬가지로 초단위로 측정하여, 최종적으로 1시간 평균 데이터를 분석에 활용하였다.

축사 내·외부 환경 모니터링을 위해 온·습도, 풍

향, 풍속을 측정하였으며, 축사 내부 온·습도 측정은 온·습도 센서 (HOBO Temp/RH Logger, UX100-011A, HOBO data Loggers Onset, USA)를 활용하였다. 축사 외부는 간이 기상대 (Watchdog 2900ET Weather station, Spectrum Technologies Inc., USA)를 설치하여 기상환경 (풍향, 풍속)을 수집하였다. 풍향은 외부 입기방향인 90~225 deg 범위의 데이터를 사용하였으며, 풍속은 km/h로 수집하여 m/s로 단위를 환산하여 분석하였다.

### 2.3 자연환기식 축사의 환기량 산정

자연환기식 축사의 환기량 측정은 NH<sub>3</sub> 배출량을 산정하기 위한 중요한 요소로, 본 연구에서는 자연환기식 축사의 환기량을 산정하기 위해서 추적가스법 (tracer-gas method)을 사용하였다. 추적가스법은 주로 CO<sub>2</sub>와 SF<sub>6</sub>를 추적가스로 사용한다. SF<sub>6</sub>의 경우 대기 중에 존재하지 않고, CO<sub>2</sub>를 사용하는 것보다 측정 방법이 복잡하다는 단점이 있다. 반면, CO<sub>2</sub>는 SF<sub>6</sub>보다 환기량 추정에 정밀도가 높다고 보고되어, 최종적으로 CO<sub>2</sub>를 추적가스로 사용하였다 (Edouard *et al.*, 2016).

또한, 축사의 환기량은 International Commission of Agricultural Engineering에서 제시된 계산법을 사용하여, 사양과 관련된 지표를 통해 Heat production

unit (HPU)을 계산하였다. 지표 중 일증체량 ( $Y_2$ )과 사료 영양가 (M)의 값은 각각 0.6 kg/day, 10 MJ/kg·drymatter이며, VERA에서 제공하는 표준값을 사용하였다(식 1). 계산된 HPU를 활용하여 최종적으로 환기량을 산정하였다(CIGR, 2002; Pedersen, 2008)(식 2).

$$HPU = \left( 7.64m^{0.69} + Y_2 \left[ \frac{23}{M} - 1 \right] \left[ \frac{57.27 + 0.302m}{1 - 0.171Y_2} \right] \right) / 1000 \quad (1)$$

HPU (W): Heat Production Unit (VERA, 2018)

m (kg): 가축 평균 무게

$Y_2$  (kg/d): 일증체량

M (MJ/kg·drymatter): 사료 영양가

$$Ventilation\ rate\ (m^3/h) = \frac{0.18(C) \times HPU}{((CO_2)_{inside} - (CO_2)_{outside}) \times 10^{-6}} \quad (2)$$

Ventilation rate ( $m^3/h$ ): 환기량

C ( $m^3/h \cdot hpu$ ): Convert coefficient

HPU (W): Heat Production Unit

$(CO_2)_{inside}$  (ppm): 내부  $CO_2$  농도

$(CO_2)_{outside}$  (ppm): 외부  $CO_2$  농도

## 2.4 $NH_3$ 배출량 산정

측정 기간 한우사에서 배출되는  $NH_3$  배출량 계산은 입기방향과 풍향이 일치하고, 풍속이 0.5 m/s 이상인 데이터만 사용하였으며, 이상치 제거 기준 ( $outlier_{upper} > upper\ quartile\ (75\%) + 1.5 \times IQR$ ,  $outlier_{low} < lower\ quartile\ (25\%) - 1.5 \times IQR$ , IQR: Inter quartile range)을 적용하여 분석하였다. VERA 프로토콜에 따르면, 데이터 이상치 제거 기준 ( $outlier_{upper} > upper\ quartile\ (75\%) + 3 \times IQR$ ,  $outlier_{low} < lower\ quartile\ (25\%) - 3 \times IQR$ )에 따라 이상치를 제거한 뒤 최종적으로  $NH_3$  배출량을 산정해야 하나, 본 연구에서는 데이터 신뢰도를 높이기 위해 VERA 프로토콜의 기준보다 더 높은 이상치 제거 기준을 적용하였다(VERA, 2018).

$NH_3$  배출량은  $CO_2$  농도를 통해 계산한 환기량

( $m^3/h$ )과 평균 내·외부  $NH_3$  농도 차(ppm)를 곱한 뒤, 마지막으로 사육두수 (n)로 나누어, 최종적으로 시간당 소 1마리가 배출하는  $NH_3$ 의 배출량이 산정된다(식 3).

$$E\ (g \cdot NH_3 / d \cdot cow) = V \times \frac{((NH_3)_{inside} - (NH_3)_{outside}) \times 24(h)}{10^3(g) \times n(cow) \times 1(d)} \quad (3)$$

E:  $NH_3$  배출량

V ( $m^3/h$ ): 환기량

$(NH_3)_{inside}$  (ppm): 내부  $NH_3$  농도

$(NH_3)_{outside}$  (ppm): 외부  $NH_3$  농도

n: 가축사육두수

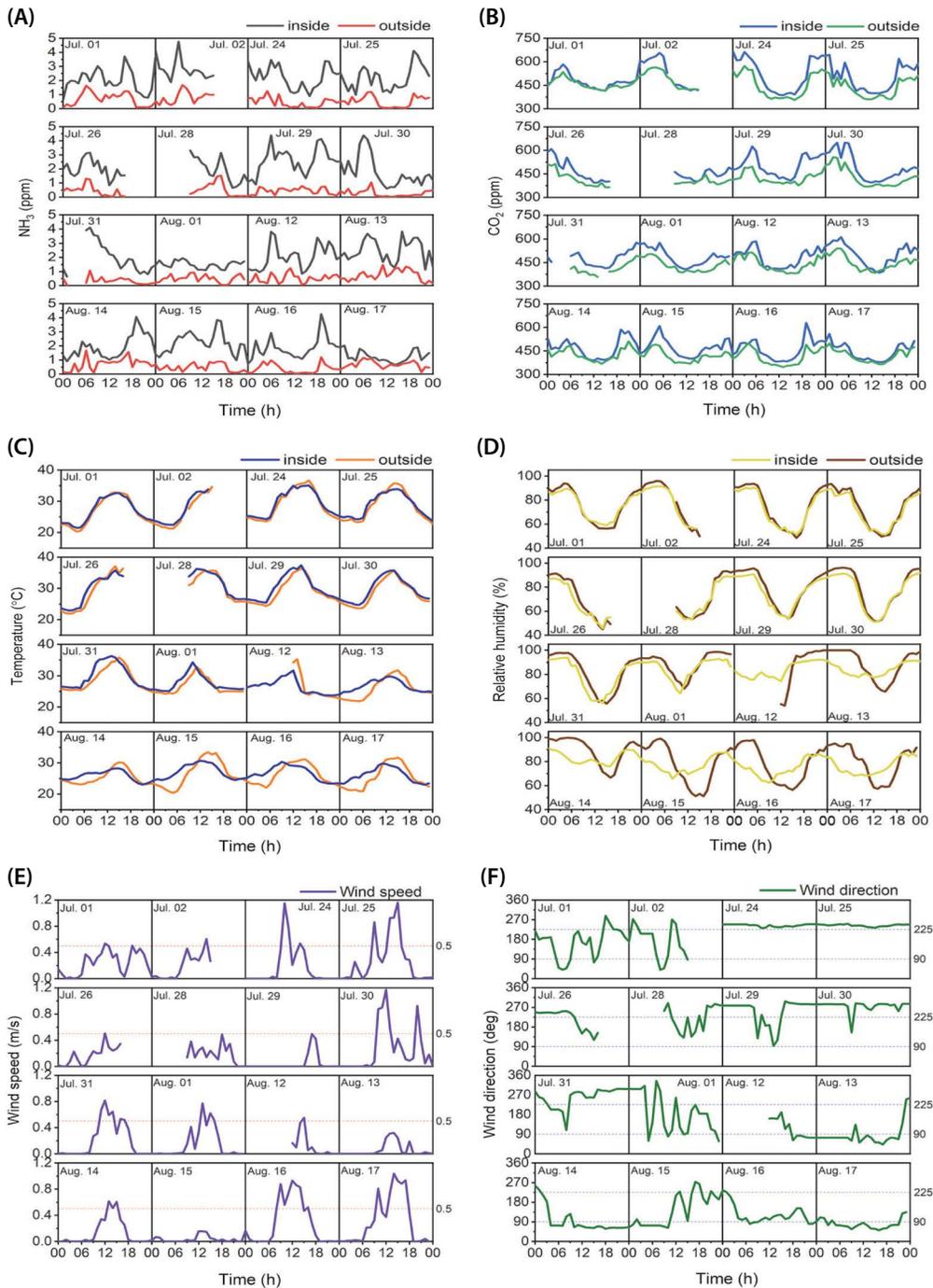
## 2.5 통계분석

통계분석은 통계 소프트웨어 Jamovi (Version 1.6)를 이용하여 수행하였다. 정규성 검정은 shapiro-wilk test를 실시하여 검토하였으며 (p-value > 0.05: 정규성 가정), 검토결과  $NH_3$  배출량,  $NH_3$  농도, 환기량, 온도, 습도 그룹은 비정규분포로 나타났다. 상관관계 분석은 모든 변수가 비정규분포 그룹이므로 spearman correlation 방식을 사용하여 분석하였다.

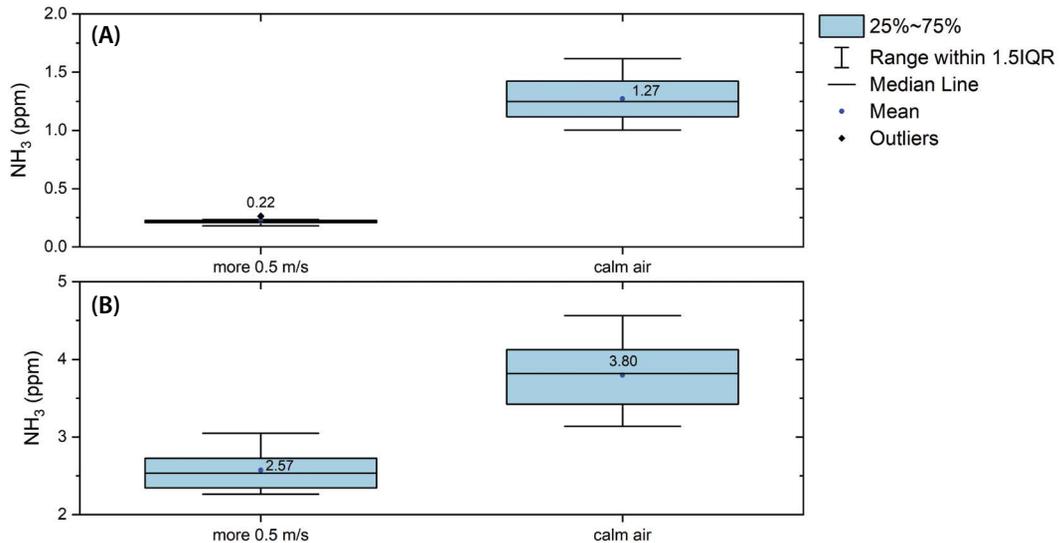
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 $NH_3$ , $CO_2$ 농도 및 환경요소 측정 결과

국내 자연환기식 한우사에서의  $NH_3$  배출량 측정을 위해, 2021년 7~8월 기간 내 16일간 측정된 축사 내·외부  $NH_3$  농도, 축사 내·외부  $CO_2$  농도, 온도, 습도, 풍향, 풍속의 시계열 자료를 그림 2에 나타내었다. 우사 내·외부의  $NH_3$  평균 농도는 각각 2.03 ppm, 0.52 ppm으로 나타났으며, 내·외부의  $NH_3$  농도 범위는 각각 0.60~4.39 ppm, 0.02~1.68 ppm으로 측정되었다(그림 2A). 본 연구의 우사 내부에는 깔짚 및 가축 분뇨의 영향을 받아 외부  $NH_3$  농도보다 약 4배 높게 나타난 것으로 판단된다. 깔짚과 분뇨에서는 미생물 활동으로 인해 유기물의 호기성 분해, urea의 가수



**Fig. 2.** Hourly monitoring result of (A) inside ammonia concentration (black), outside ammonia concentration (red), (B) inside CO<sub>2</sub> concentration (blue), outside CO<sub>2</sub> concentration (green), (C) inside temperature (orange), outside temperature (dark blue), (D) inside relative humidity (brown), outside relative humidity (yellow), (E) wind speed (purple) with reference 0.5 m/s, (F) wind direction (dark green) with reference 90, 225 deg.



**Fig. 3.** Box-plot of (A) outdoor ammonia concentration and (B) indoor ammonia concentration by wind-speed which is calm air (<0.5 m/s) and more than 0.5 m/s. Box, whisker, horizontal line, and point indicate 25~75% range of samples (skyblue),  $1.5 \times \text{IQR}$ , median, and mean (blue), respectively.

분해, 유기물의 혐기성 분해 등으로  $\text{NH}_3$ 가 발생하는 것으로 알려져 있다 (Sommer *et al.*, 2004; Jeppsson, 1999). 선행연구에 따르면, 우사에서 측정위치에 따라  $\text{NH}_3$  농도가 1.0~47.6 ppm (Park *et al.*, 2015), 0.4~8.77 ppm (Simsek *et al.*, 2012)으로 다양한 농도 범위로 나타나, 본 연구에서 측정한  $\text{NH}_3$  농도는 앞선 선행연구 결과의 농도 범위보다 낮은 농도수준으로 나타났다.

축사 내·외부  $\text{CO}_2$  평균 농도는 각각 483.47 ppm, 432.78 ppm으로 분석되었으며, 내·외부의  $\text{CO}_2$  농도는 비슷한 경향성을 보였다(그림 2B). 축사 내부 평균  $\text{CO}_2$  농도는 외부 농도보다 높게 나타났으며, 이는 축사 내부 가축 호흡에 의한  $\text{CO}_2$  때문인 것으로 판단된다(Bai *et al.*, 2020; Leytem *et al.*, 2011).

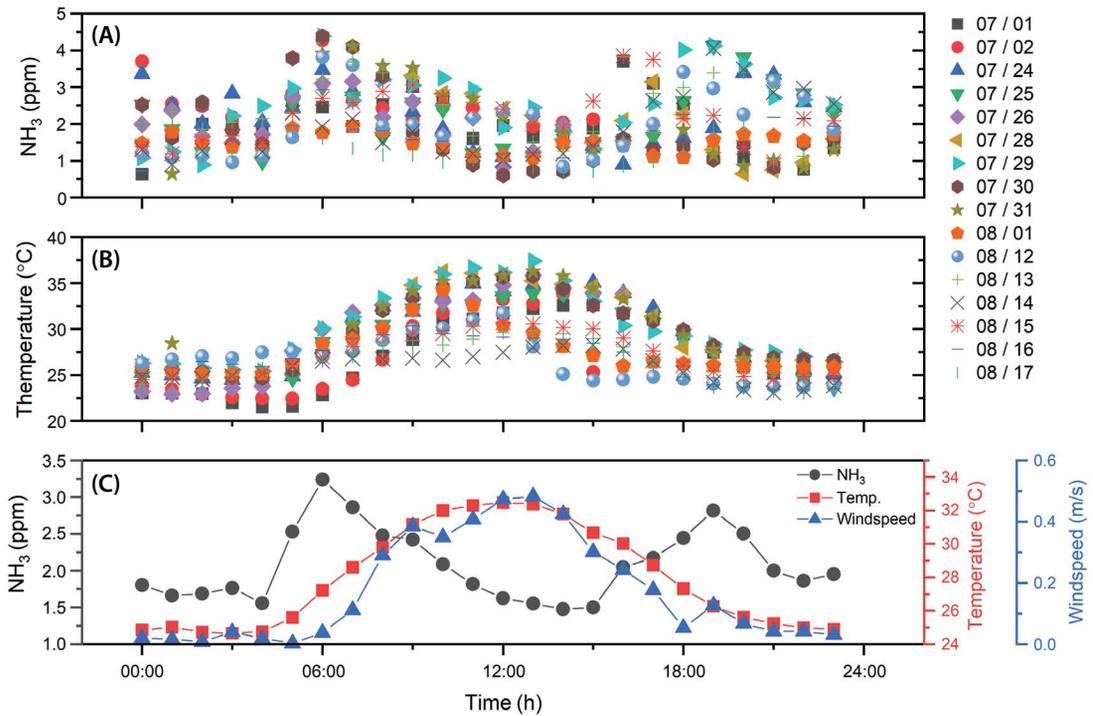
측정기간 평균 온도는 내부 28.1°C, 외부 27.5°C로 나타났으며, 평균 습도는 내부 76.9%, 외부 79.4%로 나타나, 온도는 내부가, 습도는 외부가 높은 것으로 분석되었다(그림 2C, 2D). 축사 내부와 외부의 온도 차이는 -3.51°C에서 5.09°C로 나타났다. 우사는 축사의 4면이 개방된 구조로 내·외부 온도가 유사한 패턴

을 나타내며, 축사 내부는 가축에서 발생하는 열로 인해 온도가 외부보다 높은 것으로 판단된다(Erbez *et al.*, 2010). 외부 풍속은 0~1.17 m/s 범위로 나타났으며, 평균 0.18 m/s로 측정되었다(그림 2E).

기상조건에 따른  $\text{NH}_3$  농도 특성을 확인하기 위해 풍속에 따른  $\text{NH}_3$  농도를 그림 3에 나타내었다. 풍속 0.5 m/s 미만을 무풍구간(calm air)으로 정의하였으며(Ham *et al.*, 2017), 무풍구간의  $\text{NH}_3$  평균 농도는 내부 3.80 ppm, 외부 1.27 ppm, 풍속 0.5 m/s 이상인 구간은  $\text{NH}_3$  평균농도가 내부 2.57 ppm, 외부 0.22 ppm으로 나타났다(그림 3). 무풍구간의  $\text{NH}_3$  농도는 0.5 m/s 이상일 때의  $\text{NH}_3$  농도보다 유의적으로 높게 나타났다(<0.001). 이는, 공기의 대류현상이 적어 확산이 잘되지 않기 때문에,  $\text{NH}_3$ 가 축적되어 농도가 높게 나타나는 것으로 사료된다(Zhao *et al.*, 2016).

### 3.2 시간에 따른 $\text{NH}_3$ 농도

그림 4에 시간별 축사 내부  $\text{NH}_3$  농도, 축사 내부 온도를 측정일별로 나타내고,  $\text{NH}_3$  농도와 온도, 풍속의 시간별 평균을 통해 일변화 경향성을 나타내었다.



**Fig. 4.** Diurnal variation of (A) ammonia concentration, (B) temperature and (C) average ammonia concentration, temperature, wind-speed.

16일의 측정기간 동안 NH<sub>3</sub> 농도와 온도는 일별로 유사한 경향성을 보였다(그림 4A). 특히, 0~4시에 비슷한 농도를 보였으나, 이후 급격하게 증가하여 6시에 가장 높은 NH<sub>3</sub> 농도가 관측되었다. 다시 NH<sub>3</sub> 농도는 15시까지 서서히 감소하고, 19시에 피크를 보이는 것으로 나타났다. 선행연구에 따르면 기온이 상승하면 NH<sub>3</sub> 농도가 증가하며(Chang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2015; Meng *et al.*, 2011), 사료를 급이할 때, 동물의 활동도가 증가하여 높은 NH<sub>3</sub> 농도와 배출량이 발생한다고 보고되고 있다(Jeppsson, 2002). 본 연구에서의 NH<sub>3</sub> 농도는 한우사의 사료 급이 시간이 6시와 16시인 것을 감안하였을 때, 높아진 기온과 사료 급이 영향을 받아서 NH<sub>3</sub> 농도가 증가한 것으로 사료된다. 또한, 늦은 밤에는 가축이 NH<sub>3</sub> 배출원인 깔짚 위에 누워 잠을 자지만, 낮에는 깔짚을 밟으면서 NH<sub>3</sub> 휘산이 일어나 NH<sub>3</sub> 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다

(Arnink *et al.*, 1993).

### 3.3 NH<sub>3</sub> 배출량

표 2는 앞서 측정된 NH<sub>3</sub> 농도와 CO<sub>2</sub> 농도 자료를 바탕으로 시간별 환기량(m<sup>3</sup>/h)과 소 1마리당 NH<sub>3</sub> 배출량(g·NH<sub>3</sub>/d·cow)을 나타냈다. 추가적으로 무풍 구간은 불어오는 바람 방향 실측값의 불확도가 높기 때문에, 배출량 산정에는 무풍구간을 제외한 데이터를 활용하였다(Ham *et al.*, 2017). 환기량은 평균 498,828 m<sup>3</sup>/h로 분석되었으며, 최소 환기량은 142,479 m<sup>3</sup>/h, 최대 환기량은 1,599,260 m<sup>3</sup>/h로 분석되었다. 측정기간 NH<sub>3</sub> 배출량은 13.22~223.57 g·NH<sub>3</sub>/d·cow의 범위를 나타냈으며, 평균 90.97 g·NH<sub>3</sub>/d·cow으로 분석되었다.

표 3에 다양한 지역에서 OP-TDL 장비를 이용하여 측정된 NH<sub>3</sub> 배출량 연구 결과를 나타냈다. 국내 NH<sub>3</sub>

인벤토리 보고서 (NIER, 2008)에 제시된 배출량 ( $14.50 \text{ kg} \cdot \text{NH}_3/\text{year} \cdot \text{cow}$ )은 본 연구에서 도출된  $\text{NH}_3$  배출량 ( $33.20 \text{ kg} \cdot \text{NH}_3/\text{year} \cdot \text{cow}$ )보다 2.3배가량 낮게 나타났다. 국내  $\text{NH}_3$  인벤토리 보고서에서 깔짚의 교체 경과 시간이 30일 이내인 것을 미루어봤을 때, 깔짚의 교체 경과 시간 차이로, 본 연구보다 낮은 것으로 판단된다 (NIER, 2008). 선행연구에 따르면 깔짚을 교체한 시간이 지남에 따라  $\text{NH}_3$  플럭스가 증가한다고 보고되었다 (Sa and Jeon, 2010). 또한,  $\text{NH}_3$  측정을 챔버를 활용하여 플럭스로 측정된 결과로, 실시간 측정이 반영되지 않아 과소평가되었을 것으로 사료된다. Yang *et al.* (2016)에서는  $\text{NH}_3$  배출량이

**Table 2.** Average ammonia emission and ventilation rate in this investigation.

Reference	Mean $\pm$ SD	Min	Max
Ventilation rate ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	498,828 $\pm$ 234,733	142,479	1,599,260
Ammonia emission ( $\text{g} \cdot \text{NH}_3/\text{d} \cdot \text{cow}$ )	90.97 $\pm$ 44.15	13.22	223.57

$54.20 \text{ g} \cdot \text{NH}_3/\text{d} \cdot \text{cow}$ 로 본 연구보다 낮게 나타났다. 이는 본 연구와는 다른 배출량 산정 방법인 역확산 기술을 활용하여 배출량을 산정하였으며, 측정 위치도 축사 내부가 아닌 축사 사이에서 측정하여 차이를 보인 것으로 판단된다.

추가적으로  $\text{NH}_3$  농도, 환기량, 온도, 상대습도와와의 상관관계 분석 결과를 표 4와 그림 5에 나타냈다.  $\text{NH}_3$  배출량과의 상관도는 환기량 ( $r=0.521$ ),  $\text{NH}_3$  농도 ( $r=0.521$ ), 습도 ( $r=-0.137$ ), 온도 ( $r=0.122$ ) 순으로 나타나, 습도를 제외한 모든 요인이  $\text{NH}_3$  배출량과 양의 상관성을 나타내는 것으로 분석되었다. 선행연구에 따르면,  $\text{NH}_3$  배출량은 환기량과 양의 상관관계를 보이며 (Sanchis *et al.*, 2019; Simsek *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2005), 내부 온도의 영향을 받아 온도 상승 시  $\text{NH}_3$  발생량도 함께 증가한다 (Sanchis *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2005). 또한, 높은 온도가  $\text{NH}_3$  가스 용해도를 감소시키고, Total Ammonia Nitrogen (TAN)의 비율을 증가시켜 최종적으로  $\text{NH}_3$  휘산을 촉진하기 때문에 고농도가 발생한다 (Meisinger and

**Table 3.** Comparison to previous studies of ammonia emissions from cattle feedlots.

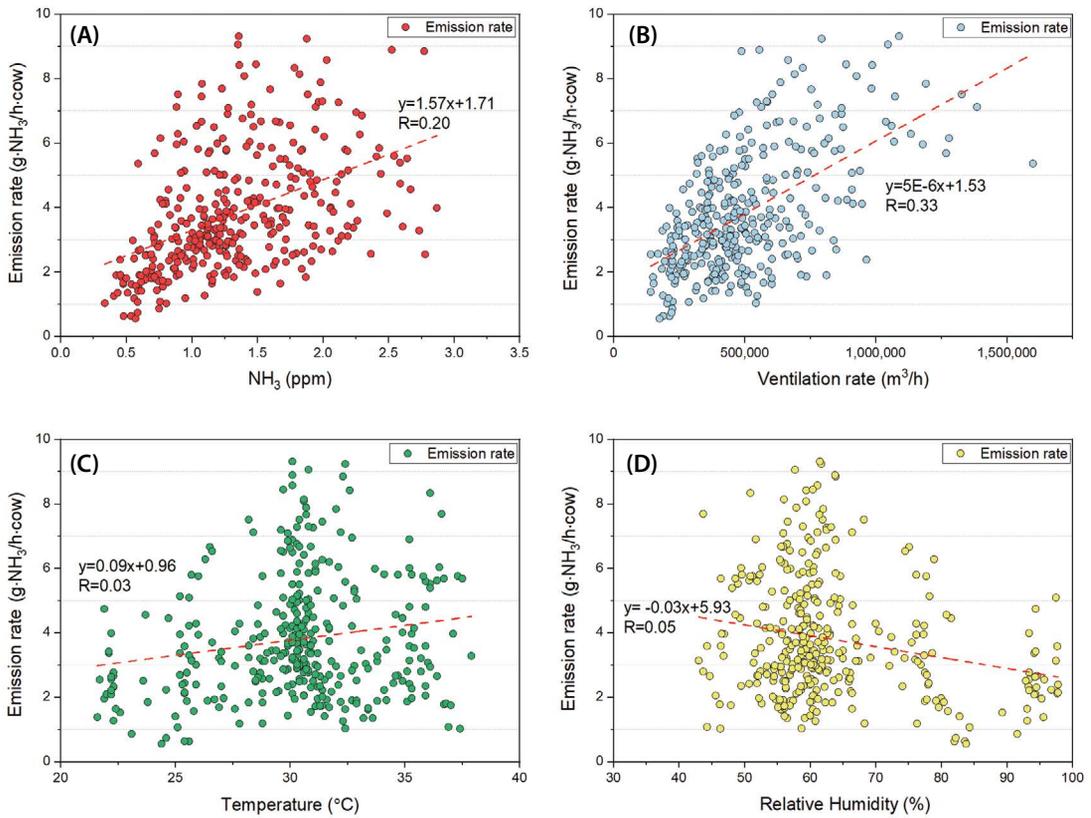
Reference	$\text{NH}_3$ emission		Measurement of concentration
	( $\text{kg} \cdot \text{NH}_3/\text{year} \cdot \text{cow}$ )	( $\text{g} \cdot \text{NH}_3/\text{d} \cdot \text{cow}$ )	
This study	33.20	90.97	OP-TDL
NIER (2008)	14.50	39.73*	Dynamic flux chamber
Yang <i>et al.</i> (2016)	19.80	54.20	OP-TDL
van Haarlem <i>et al.</i> (2008)	116.07**	318.00	OP-TDL
McGinn <i>et al.</i> (2007)	51.10**	140.00	OP-TDL
Flesch <i>et al.</i> (2007)	54.75**	150.00	OP-TDL

\*Unit conversion  $\text{kg} \cdot \text{NH}_3/\text{year} \cdot \text{cow}$  to  $\text{g} \cdot \text{NH}_3/\text{d} \cdot \text{cow}$

\*\*Unit conversion  $\text{g} \cdot \text{NH}_3/\text{d} \cdot \text{cow}$  to  $\text{kg} \cdot \text{NH}_3/\text{year} \cdot \text{cow}$

**Table 4.** Correlation analysis of ammonia concentration, ventilation rate, temperature, relative humidity, and ammonia emission.

	Concentration	Vantilation rate	Temperature	Relative humidity	Emissions
Concentration	-				
Vantilation rate	-0.390	-			
Temperature	-0.081	0.211	-		
Relative humidity	0.016	-0.149	-0.859	-	
Emissions	0.521	0.521	0.122	-0.137	-



**Fig. 5.** Correlation of emission vs ammonia concentration (A), emission rate vs ventilation rate (B), emission rate vs temperature (C), emission rate vs relative humidity (D).

Jokela, 2000). 따라서 본 연구에서도 온도상승의 영향을 받아 NH<sub>3</sub>가 높아진 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 자연환기식 한우사에서 NH<sub>3</sub> 배출농도와 환기량을 측정하여 최종적으로 NH<sub>3</sub> 배출량을 산정하였다. 여름철 개방된 한우사에서 16일 동안 수행하였으며, NH<sub>3</sub>와 CO<sub>2</sub> 농도는 OP-TDL을 사용하여 측정하고 환기량은 추적가스(CO<sub>2</sub>)법으로 추정하였다. 측정 결과 축사 내·외부의 NH<sub>3</sub> 평균 농도는 각각 2.03 ppm, 0.52 ppm, 평균 환기량은 498,828 m<sup>3</sup>/h으로 나타났다. 또한, 축사 내·외부 온도는 각각 28.1°C,

27.5°C로 측정되었다. 축사 내부의 NH<sub>3</sub> 농도는 사료를 급여하는 시간대에 가축의 활동성이 증가하면서 NH<sub>3</sub> 휘산에 영향을 받아 높은 농도로 나타났다. 측정기간 NH<sub>3</sub> 농도와 추정환기량을 사용하여 소 1마리당 산정한 NH<sub>3</sub> 배출량은 90.97 g·NH<sub>3</sub>/d·cow로 분석되었다. 상관관계 분석결과, NH<sub>3</sub> 농도, 환기량, 온도가 NH<sub>3</sub> 배출량과 양의 상관관계를 보여, 환기량이 증가하거나, 온도가 증가함에 따라 NH<sub>3</sub> 배출량이 증가하는 경향을 보였다.

현재까지 본 연구는 OP-TDL를 이용하여 개방식 한우사에서 NH<sub>3</sub> 배출 특성을 측정한 최초의 연구지만, 측정기간이 여름철로 한정되어 있어 국내 NH<sub>3</sub> 배출계수로 적용하기엔 대표성이 부족하다. 따라서 국내 NH<sub>3</sub> 인벤토리 구축을 위해서 다양한 계절(봄, 가

을, 겨울)의 NH<sub>3</sub> 배출량 측정이 이루어져야, 전체 국가 배출계수를 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ01499302)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Arnink, A.J.A., Koetsier, A.C., van den Berg, A.J. (1993) Dunging and lying behaviour of fattening pigs in relation to pen design and ammonia emission. In: Fourth International Symposium and Livestock Environment (Collins E; Boon C, eds), University of Warwick, Coventry, England, 1176-1183.
- Bai, M., Flesch, T., Trouve, R., Coates, T., Butterly, C., Bhatta, B., Hill, J., Chen, D. (2020) Gas emissions during cattle manure composting and stockpiling, *Journal of Environmental Quality*, 49(1), 228-235. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20029>
- Bailey, D.M., Adkins, E.M., Miller, J.H. (2017) An open-path tunable diode laser absorption spectrometer for detection of carbon dioxide at the Bonanza Creek Long-Term Ecological Research Site near Fairbanks, Alaska, *Applied Physics B*, 123, 245. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6814-8>
- 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 & Technology*, 53, 1822-1833. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05984>
- DeBruyn, Z.J., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A. (2020) Assessment of open-path spectrometer accuracy at low path-integrated methane concentrations, *Atmosphere*, 11, 184. <http://doi.org/10.3390/atmos11020184>
- Edouard, N., Mosquera, J., Dooren, H.J.C., Mendes, L.B., Ogink, N.W.M. (2016) Comparison of CO<sub>2</sub>- and SF<sub>6</sub>-based tracer gas methods for the estimation of ventilation rates in a naturally ventilated dairy barn, *Biosystems Engineering*, 149, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.001>
- Erbez, M., Falth, D., Chládek, G. (2010) The relationships between temperature and humidity outside and inside of a permanently open-sided cow's barn, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58(5), 91-96. <https://doi.org/10.11118/actaun201058050091>
- Flesch, T.K., Wilson, J.D., Harper, L.A., Todd, R.W., Cole, N.A. (2007) Determining ammonia emissions from a cattle feedlot with an inverse dispersion technique, *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2), 139-155. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.02.006>
- Ham, J.Y., Lee, H.J., Cha, J.W., Ryoo, S.B. (2017) Potential Source of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and OC and EC in Seoul During Spring 2016, *Atmosphere*, 27(1), 41-54, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.1.041>
- 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>
- International Commission of Agricultural Engineering (CIGR) (2002) 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and moisture production at animal and house levels, 5-46.
- Jeppsson, K.-H. (1999) Volatilization of Ammonia in Deep-litter Systems with Different Bedding for Young Cattle, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73(1), 49-57. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0387>
- Jeppsson, K.-H. (2002) Diurnal variation in ammonia, carbon dioxide and water vapour emission from an insulated, deep litter building for growing/finishing pigs, *Biosystems Engineering*, 81(2), 213-223. <https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0025>
- 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.3390/atmos11101088>
- Lee, Y.B., Lee, S.J., Chang, H.H. (2013) Assessment of the Amount of Ammonia Emitted from Hanwoo Loose Barn and Winch-curtain Broiler House, *Journal of Agriculture & Life Science*, 47(6), 193-201, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14397/jals.2013.47.6.193>

- Leytem, A.B., Dungan, R.S., Bjerneberg, D.L., Koehn, A.C. (2011) Emissions of ammonia, methane, carbon dioxide, and nitrous oxide from dairy cattle housing and manure management systems, *Journal of Environmental Quality*, 40(5), 1383-1394. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0515>
- McGinn, S.M., Flesch, T.K., Crenna, B.P., Beauchemin, K.A., Coates, T. (2007) Quantifying ammonia emissions from a cattle feedlot using a dispersion model, *Journal of Environmental Quality*, 36(6), 1585-1590. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0167>
- McGinn, S.M., Flesch, T.K., Harper, L.A., Beauchemin, K.A. (2006) An approach for measuring methane emissions from whole farms, *Journal of Environmental Quality*, 35(1), 14-20. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0250>
- Meisinger, J.J., Jokela, W.E. (2000) Ammonia Volatilization from dairy and poultry manure, *Proc Managing nutrients and pathogens from animal agriculture*, 28-30.
- Meng, Z.Y., Lin, W.L., Jiang, X.M., Yan, P., Wang, Y., Zhang, Y.M., Jia, X.F., Yu, X.L. (2011) Characteristics of atmospheric ammonia over Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(12), 6139-6151. <https://doi.org/10.5194/acp-11-6139-2011>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2008) Estimating Ammonia Emissions in Atmosphere and Constructing an Inventory.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) National air pollutants emission service. <http://airemiss.nier.go.kr> (assessed on Nov. 01, 2021).
- Park, J.H., Seok, J.W., Lee, S.A., Kwon, O.H., Lee, K.S., Heo, Y., Yoon, C.S. (2015) Ammonia and Hydrogen Sulfide Monitoring in Broiler Barns and Cattle Barns, *Journal of Environmental Health Science*, 41(5), 277-288, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/JEHS.2015.41.5.277>
- Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., Jorgensen, H., Chwalibog, A. (2014) Carbon Dioxide Production in Animal Houses: *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*. Manuscript BC 08 008, Vol. X. December, 2008. <https://www.researchgate.net/publication/37791707>
- Sa, J., Jeon, E. (2010) Estimation of Ammonia Flux and Emission Factor from Cattle Housing Using Dynamic Flux Chamber, *Journal of Environmental Health Science*, 36(1), 33-43, (in Korean with English abstract).
- Sanchis, E., Clavet, S., Prado, A.d. (2019) A meta-analysis of environmental factor effects on ammonia emissions from dairy cattle houses, *Biosystem Engineering*, 178, 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2018.11.017>
- Simsek, E., Kilic, I., Yaslioglu, E., Arici, I. (2012) Ammonia Emissions from Dairy Cattle Barns in Summer Season, *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 11(12), 2116-2120. <https://doi.org/10.3923/javaa.2012.2116.2120>
- Somesfalean, G., Alnis, J., Gustafsson, U., Edner, H., Scanberg, S. (2005) Long-path monitoring of NO<sub>2</sub> with a 635 nm diode laser using frequency-modulation spectroscopy, *Applied Optics*, 44(24), 5148-5151. <https://doi.org/10.1364/AO.44.005148>
- Sommer, S.G., Schjoerring, J.K., Denmead, O.T. (2004) Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops, *Advances in Agronomy*, 82, 557-622. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82008-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82008-4)
- Statistics Korea (Kostat) (2021) Census of Agriculture, Forestry and Fisheries, Number of livestock farm by type of barn, [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT\\_1AG20509&conn\\_path=l2](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1AG20509&conn_path=l2) (assessed on Nov. 01, 2021).
- Thoma, E.D., Shores, R.C., Thompson, E.L., Harris, D.B., Thorneloe, S.A., Varma, R.M., Hashmonay, R.A., Modrak, M.T., Natschke, D.F., Gamble, H.A. (2005) Open-Path Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for Acquisition of Fugitive Emission Flux Data, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55, 658-668. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464654>
- 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>
- van Haarlem, R.P., Desjardins, R.L., Gao, Z., Flesch, T.K., Li, X. (2008) Methane and ammonia emissions from a beef feedlot in western Canada for a twelve-day period in the fall, *Canadian Journal of Animal Science*, 88(4), 641-649. <https://doi.org/10.4141/CJAS08034>
- Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production (VERA) (2018) VERA TEST PROTOCOL for Livestock Housing and Management Systems, 3, 1-60.
- 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>
- Webster, K.D., White, J.R., Pratt, L.M. (2015) Ground-level con-

centrations of atmospheric methane in southwest Greenland evaluated using open-path laser spectroscopy and cavity-enhanced absorption spectroscopy. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47(4), 599-609. <https://doi.org/10.1657/AAAR0014-051>

- Yang, Y., Liao, W., Wang, X., Liu, C., Xie, Q., Gao, Z., Ma, W., He, Y. (2016) Quantification of ammonia emissions from dairy and beef feedlots in the Jing-Jin-Ji district, China, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 232, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.016>
- Zhang, G., Strøm, J.S., Li, B., Rom, H.B., Morsing, S., Dahl, P., Wang, C. (2005) Emission of Ammonia and Other Contaminant Gases from Naturally Ventilated Dairy Cattle Buildings, *Biosystems Engineering*, 92(3), 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.08.002>
- 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>

## Authors Information

서시영 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)  
 박준수 (국립축산과학원 축산환경과 전문연구원)  
 장유나 (전북지방환경청 환경관리과 환경연구사)  
 하태환 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)  
 권경석 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)  
 정민웅 (국립축산과학원 축산환경과 농업연구관)