



논문

강제환기식 모돈사의 여름과 겨울철 암모니아 배출 특성 분석

Comparison of Ammonia Emission Characteristics from Sows in Summer and Winter

박소연, 정민웅, 서시영, 우샘이, 황옥화, 조슈아나이젤할더, 장유나¹⁾,
조광곤²⁾, 박준수*

국립축산과학원 축산환경과, ¹⁾전북지방환경청 환경관리과
²⁾금강유역환경청 측정분석과

접수일 2022년 10월 12일
수정일 2022년 11월 3일
채택일 2022년 11월 4일

Received 12 October 2022
Revised 3 November 2022
Accepted 4 November 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)63-238-7403
E-mail : karmon2@korea.kr

Soyean Park, Min-Woong Jung, Siyoung Seo, Saem-Ee Woo, Okhwa Hwang,
Joshua Nizel Halder, Yuna Jang¹⁾, Gwanggon Jo²⁾, Junsu Park*

Animal Environment Division, Department of Animal Biotechnology and Environment,
National Institute of Animal Science (NIAS), Iseo-myeon, Jeollabuk-do, Republic of Korea

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

²⁾Monitoring and Analysis Division, Geum River Basin Environment Office, Daejeon, Republic of Korea

Abstract In Korea, about 74% of ammonia emission is from livestock manure in the agricultural sector. Ammonia emission control is being more important because it not only harms the health of humans, animals, and plants but also acts as a precursor to generating secondary organic aerosol. Therefore, this study was conducted for 92 days in summer and 74 days in winter, in order to estimate the amount of ammonia emission in the sow house. By collecting data on ammonia concentration, ventilation rate, temperature, and humidity in real-time, the diurnal pattern was identified, and the ammonia emission factor in the gestating sow house was calculated. As a result, the ammonia concentration in the gestating sow house in summer and winter were 3.95~9.80 ppm and 10.50~31.52 ppm, respectively. And ventilation rate was measured in the range of 60.54~104.39 m³/h/pig in summer and 26.61~64.39 m³/h/pig in winter. In this study, the average ammonia emission factors per gestating sow in summer and winter were 7.38 and 16.90 g/day/pig, respectively. Since the emission factor differs depending on the season, it seems necessary to consider the season when evaluating ammonia emission. The results of this study are considered to be useful data for improving the domestic ammonia inventory.

Key words: Ammonia, Emission factor, Gestating sow, Seasonal, Mechanical ventilation

1. 서론

환경부의 가축분뇨 처리 통계에 따르면 2019년 국내 가축사육두수는 291,996두로 2011년에 비해 1.4배 가량 증가하였으며, 매일 14만ton 이상의 가축분뇨가 발생하는 것으로 보고되었다(MOE, 2020). 가축분뇨는 그 자체 혹은 처리과정 중에 암모니아(NH₃)나 메탄(CH₄) 등 온실가스 또는 악취 물질을 배출한다(Wang *et al.*, 2021; Chadwick *et al.*, 2011). 특히 암모

니아는 국가 지정악취물질 22종 중 하나로써 대기 중 존재하며 인간 건강, 가축 및 식물 생육 저하 및 폐질환을 유발하는 등 생태계에 광범위한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Jang *et al.*, 2021; Kriz *et al.*, 2021; Seo *et al.*, 2021; Mosquera *et al.*, 2005; Brunekreef and Holgate, 2002; Kristensen and Wathes, 2000). 또한 대기 중 암모니아는 대기오염물질과 화학반응을 통해 질산암모늄(NH₄NO₃), 황산암모늄((NH₄)₂SO₄)과 같은 2차 미세먼지를 생성한다(Zhang *et al.*, 2018; Holt

et al., 2015; Behera and Sharma 2012; Wang *et al.*, 2011). 이러한 2차 미세먼지는 대기 중 부유하며 가시성을 저하시키고, 폐질환 유발 등 인체에 악영향을 미칠 수 있다(Horne *et al.*, 2018; Russell and Brunekreef, 2009).

국가 대기오염물질 배출량 자료인 CAPSS (Clean Air Policy Support System)에 따르면 국내 암모니아 배출량은 2014년 292,501 ton, 2019년 316,299 ton으로 매년 지속적인 증가 추세를 보였다. 2019년 배출량 기준으로 약 80% (252,444 ton)가 농업부문에서 배출되었으며, 이중 ‘분뇨관리’가 74% (233,644 ton, 농업 부문의 약 93%)를 차지했다. 가축 분뇨관리부문 내, 소, 돼지, 닭, 기타 가금류 중에서 돼지에서 발생하는 암모니아 발생량이 45% (106,035 ton)로 가장 높은 비율을 차지했다. 마찬가지로 국외에서도 농업부문 중 가축분뇨가 주요한 암모니아 배출 경로로 보고되었다. 유럽 연합에서 농업이 차지하는 암모니아 배출량은 2020년 기준 3,129,183 ton으로 약 92%였으며, 이 중에서 가축분뇨에서 유래하는 비율이 78%로 가장 크게 나타났다(Eurostat, 2020; Faber *et al.*, 2019; Sapek, 2013).

국내 암모니아 배출량 인벤토리 분류체계는 2007년 발간된 국립환경과학원 보고서에 따라 축종별, 사양단계별로 나누어져 있다(NIER, 2008). 돼지의 경우 사양단계에 따라 자돈, 육성돈, 비육돈, 모돈으로 구분되며, 다시 각각의 세세분류에 따라 돈사 내, 퇴비장, 축산폐수처리, 토양시비로 나뉜다. 그러나 현재 국내에 적용되는 사양단계별 암모니아 배출계수는 단기간 측정된 데이터를 반영한 결과이며, 추가적인 연구의 부족 및 국내 공인된 암모니아 배출계수 측정 방식의 부재로 과대·과소 평가될 우려가 있는 것으로 보인다. 이를 개선하기 위해 축종과 사양단계뿐만 아니라 기상조건, 계절 등 환경적 요인을 함께 고려하여 측정 방법을 구축하고 연구를 진행할 필요성이 있다. 반면에 국외에서는 암모니아 배출량 평가 및 제어를 위해 VERA test protocol 등 공인된 방법론에 따라 활발한 연구가 이루어지고 있다(Bobrowski *et*

al., 2021; Tabase *et al.*, 2020; Zhuang *et al.*, 2020). 이에 본 연구는 유럽 3개국에서 사용하는 암모니아 배출계수 산정 프로토콜을 차용하여 여름철과 겨울철 강제환기식 모돈사 내 암모니아 농도, 환기량, 온도, 습도를 측정하였다. 측정된 자료를 활용하여 암모니아 배출량을 계산하고 최종적으로 암모니아 배출량 특성 분석 및 배출계수를 산정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 돈사 구조 및 사육환경

본 연구는 돈사 내 ‘모돈’에서 발생하는 암모니아 배출계수를 산정하기 위해 2021년 여름철 92일, 2021~2022년 겨울철 74일 동안 충북 단양에 위치한 축사에서 수행되었으며, 그림 1에 실험 돈사의 단면도, 평면도를 나타냈다. 현재 국내에는 공인된 암모니아 배출량 산정 프로토콜이 전무하므로 국외 암모니아 배출량 산정 방법인 VERA (Verification of environmental technologies for agricultural production) Test Protocol 중 livestock housing and management systems 방법론에 준하여 측정을 진행하였다(표 1) (VERA, 2018). 측정결과와 신뢰도 및 정확도를 향상시키기 위해 내부 구조가 동일한 3곳의 돈방을 선정하여(room 1~3) 같은 기간 동안 모니터링을 수행하였다. 각 돈방은 5개의 사육구역(1구역당 26개의 stall)과 후보 모돈을 사육하는 6개의 사육공간(pen)으로 구성되어 있으며, room 1~3 각각 154, 154, 156마리의 모돈을 사육하고 있다. 분만이 임박한 돼지는 1개의 사육구역(약 26마리) 기준으로 분만사 이동 후, 분만 및 포유를 4~5주간 진행한다. 이후 다시 모돈사로 이동하였으며, 이때 돈방의 사육공간은 VERA 프로토콜에 권고된 기준을 따라 99% 이상 모돈으로 채워져 있었다(VERA, 2018). 돈방의 환기는 외부의 깨끗한 공기가 돈사 바깥쪽 측면에서 돈방 중 천장으로 들어온 뒤, 내부 천장에 위치한 4개의 배기 팬을 통해 배출되는 시스템으로 이루어졌다. 돈방 내

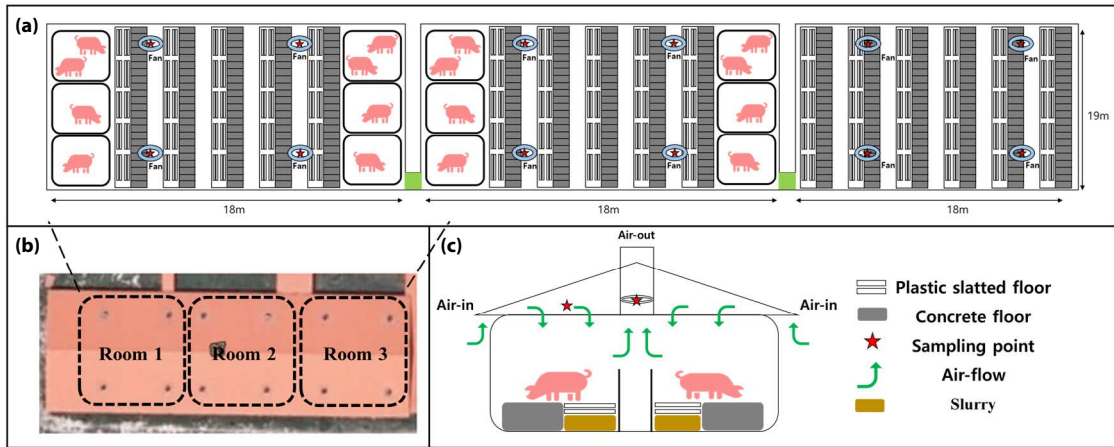


Fig. 1. Site description of gestating sow house. (a) floor plan (b) top-view and (c) cross section.

Table 1. Comparison of agronomic requirements for pigs in VERA and farm condition.

Criterion	This farm	VERA protocol
Animal occupation rate of test (%)	99~100	90~100
Minimum number of animals in the test compartment (pigs)	154~156	20
Feed requirements crude protein (%)	≤ 13.50	11~14
Minimum production requirements (piglets sow ⁻¹ year ⁻¹)	26	22

Table 2. Percentage of feed composition provided to sows during the measurement period.

Items	Crude protein	Crude fat	Calcium	Phosphorus	Crude fiber	Crude ash	Lysine
Percentage (%)	≤ 13.50	≥ 3.00	≥ 0.65	≤ 1.50	≤ 8.00	≤ 8.00	≥ 0.60

바닥은 콘크리트와 플라스틱 슬랏이 1:1 비율로 구성되었으며, 모든 분과 노는 슬랏 아래로 떨어져 피트에 저장되는 피트돈사 구조이다. 피트 내 저장된 가축분뇨는 매주 화요일마다 일정량 배출하여 전체 부피의 약 70~80% 수준을 유지하였다. 측정기간 동안 모돈에게 공급한 사료의 주요 성분을 표 2에 나타냈으며, 주요 성분 함량은 조단백질 13.5% 이하, 조지방 3% 이상, 칼슘 0.65% 이상, 인 1.5% 이하이다. 해당 공급사료는 VERA 프로토콜에서 권고하는 임신돈 사료의 단백질 함량기준(11~14%)을 충족하였다.

2.2 농도, 환기량, 온/습도 측정

돈방 내 암모니아 농도는 광음향분광법 기반의 실

시간 측정기 (LumaSense Technologies INNOVA 1512i, Ballerup, Denmark)를 사용하여 모니터링하였다. 다지점 측정을 위해 멀티샘플러 (LumaSense Technologies INNOVA 1409, Ballerup, Denmark)를 부착하여 돈방 내 각 배기팬의 배기농도와 입기농도를 측정하였다. VERA 프로토콜에 따르면 암모니아 배출량 평가 시 시간당 최소 1개의 데이터를 확보하는 것으로 권장하고 있지만, 현장 상황과 기기 과부하 문제를 고려하여 2시간 간격으로 측정을 진행하였다. 1회 측정 시 선행연구에서 보고된 최소흡인횟수를 고려하여 (Jo *et al.*, 2020) 4~6회에 측정된 값의 평균을 대푯값으로 이용하였다. 또한 측정 기기의 정확도 확인을 위해 측정 이후 고순도 질소 (Daedeok

gas, 99.999%, Korea)와 암모니아 표준가스(Rigas, Korea)를 이용하여 검정을 진행하였다. 총 7개 농도의 표준가스(0, 5, 10, 20, 25, 30, 50 ppm)를 측정된 결과, 검량선은 $Y = 0.90X + 0.19$, $R^2 = 0.9996$ 으로 나타났다. 기기검정은 현장 투입 전, 후로 두 차례 실시하였다.

환기량은 배기팬의 각 가동률(30, 50, 70, 100%)에 따른 유량을 소형 환기량 측정장치를 이용하여 실측한 후, 해당 가동률을 벗어나는 구간(31~49%, 51~69%, 71~99%)에 대해서는 로지스틱 곡선(logistic curve)에 따른 추정값을 적용하여 도출하였다(Jo *et al.*, 2020). 환기팬의 가동률은 1% 범위로 조절되며 매 1시간마다 실시간 측정되었다. 돈방 내부의 온도는 내부 관제시스템을 통해 실시간으로 측정되었으며, 상대습도는 INNOVA를 통해 측정된 이슬점 데이터를 식(1)에 적용하여 계산하였다(Sonntag, 1990). 실험기간 내 수집된 모든 데이터는 VERA 프로토콜의 이상치 제외 기준(Outlier-upper > Upper quartile (75th; Q) + (3 × IQR), Outlier-lower > Lower quartile (25th; Q) - (3 × IQR)에 따라 정리되었다.

겨울철 일부 기간(2021년 2월 8일~17일, 22일~28일)은 축사의 정전 및 점검 등 현장상황에 의해 데이터 결측 구간이 발생하여 분석에서 제외되었다.

$$T_{dew} = \frac{\lambda \times \left\{ \ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{\beta \times T}{\lambda + T} \right\}}{\beta - \left\{ \ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{\beta \times T}{\lambda + T} \right\}} \quad (1)$$

T: Temperature of pig room ($-45^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$)

RH: Relative humidity (%)

β : 17.62

λ : 243.12°C

2.3 배출량 산정

암모니아 배출량은 25°C 1기압, 즉 표준상태에서의 암모니아 농도(ppm)를 단위 부피당 암모니아 질량으로 변환 후 환기량을 곱하여 산출하였다. 이후 계산된 배출량을 다시 돈방 내 돼지사육두수로 나누

어 돼지 1마리당 암모니아 배출계수를 산정하였다(식(2)). 이때 암모니아 농도는 배기구와 입기구에서의 측정값 차이를 계산하여 순수하게 돈방에서 발생하는 암모니아 농도 값을 적용하였다.

$$\begin{aligned} NH_3 \text{ emission rate (g/h/pig)} \\ = \frac{(NH_{3 \text{ out}} - NH_{3 \text{ in}}) \times 17.03 \times V_f}{24.45 \times 1000 \times \text{pig}} \quad (2) \end{aligned}$$

$NH_{3 \text{ out}}$ = 배기구 암모니아 농도(ppm)

$NH_{3 \text{ in}}$ = 입기구 암모니아 농도(ppm)

V_f = 환기량(m^3/h)

pig = 총 돼지 사육두수

3. 결과 및 고찰

3.1 여름철 및 겨울철 암모니아 배출 특성

2021년 여름철, 2021~2022년 겨울철 기간 동안 room 1~3에서 측정된 암모니아 농도, 환기량 및 온·습도의 평균값 데이터를 그림 2에 나타냈다. 그림 3은 여름철 및 겨울철 돈방 내 암모니아 농도, 암모니아 배출량, 온·습도 및 환기량의 평균값을 보여준다. 여름철 돈사 내 암모니아 농도 범위는 3.67~9.36 ppm이며, 평균 5.39 ± 0.95 ppm으로 나타났다. 반면 겨울철 돈사 내 암모니아 농도는 6.91~30.99 ppm, 평균 22.41 ± 4.25 ppm으로 여름철에 비해 4배 이상 높은 수준으로 나타났다. 외부 온도가 크게 낮아지는 겨울철은 돈사 내부의 온도 유지를 위해 환기량이 낮아지며, 그로 인해 암모니아가 내부에 축적되면서 농도가 증가한 것으로 판단된다. 선행연구에 보고된 모돈사 내 평균 암모니아 농도는 11.02~21.01 ppm 범위로 본 연구에서 측정된 암모니아 농도 값과 다소 차이가 있었다(Park *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022; Philippe *et al.*, 2011). 일반적으로 암모니아 농도는 돈사 구조 및 환기 형태, 사료 성분, 계절별 특성 등에 따라 달라질 수 있다(Jang *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2010).

여름철과 겨울철 돈방 내 온도 범위는 각각 22.96~

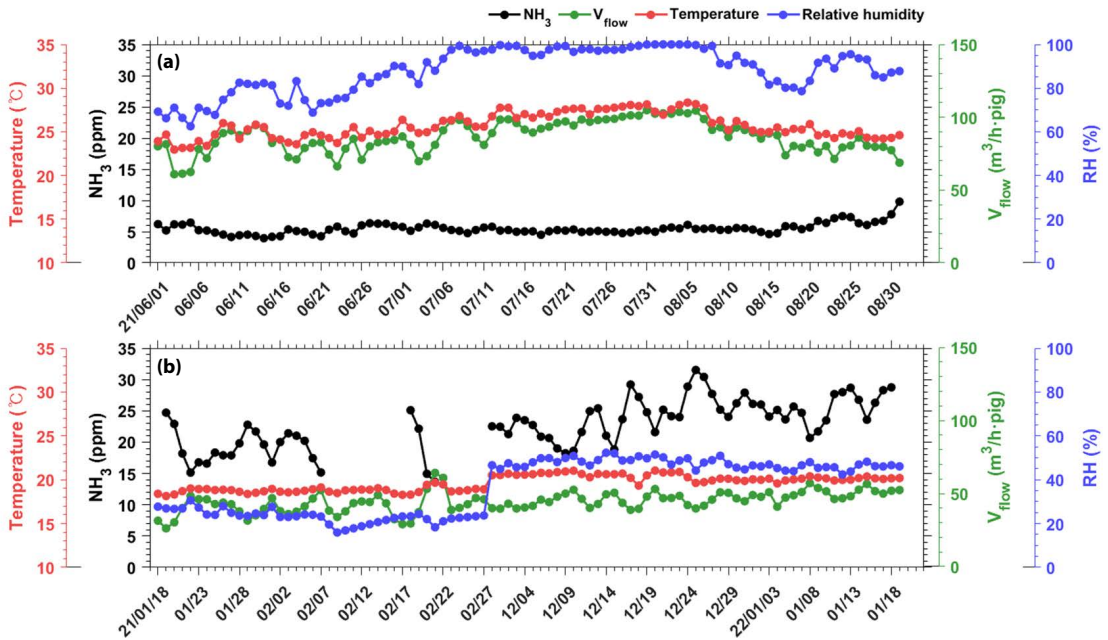


Fig. 2. Daily monitoring results of NH₃ concentration, ventilation rate, indoor temperature and relative humidity during (a) summer and (b) winter.

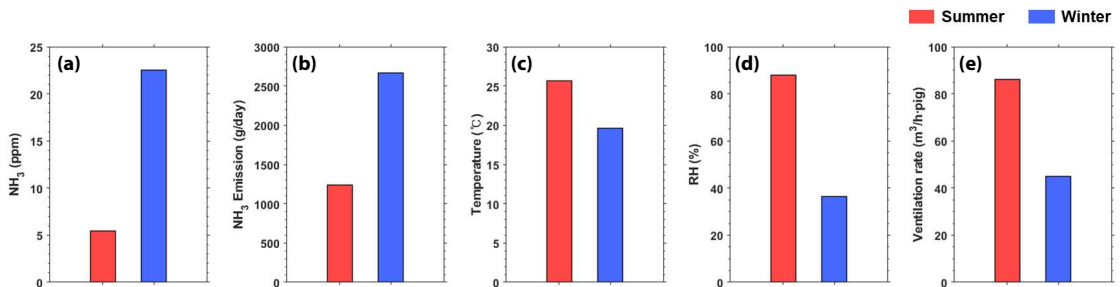


Fig. 3. Comparison of (a) NH₃ concentration, (b) NH₃ emission, (c) indoor temperature, (d) relative humidity and (e) ventilation rate between summer and winter.

28.34°C, 18.14~21.04°C이며, 내부 습도는 여름철 63~100%, 겨울철 16~52%로 상이한 환경조건을 보였다. 측정기간 환기량은 여름철 60.54~104.39 m³/h/pig, 겨울철 26.61~64.39 m³/h/pig로 나타났으며, 평균 환기량은 각각 86.07 ± 10.59, 44.86 ± 6.89 m³/h/pig로 여름철에 더 높았다. 돈사 내 환기팬의 가동률은 내부 온도와 연동하여 달라지며, 내부 온도가 높아지는 여름철이 겨울철에 비해 약 2배 높은 환기량을 나

타냈다. 따라서 여름철 상대적으로 더 많은 환기가 이루어지기 때문에 돈사 내 암모니아 농도가 더 낮은 것으로 분석되었다.

돈사 내 암모니아 농도와 환기량 측정자료를 통해 일별 암모니아 배출량을 산정하였다. 여름철 일별 암모니아 배출량의 범위는 834.86~1639.19 g/day이며 평균 1141.75 ± 179.52 g/day로 나타났다. 반면 겨울철 암모니아 배출량은 1754.36~3827.43 g/day, 평균

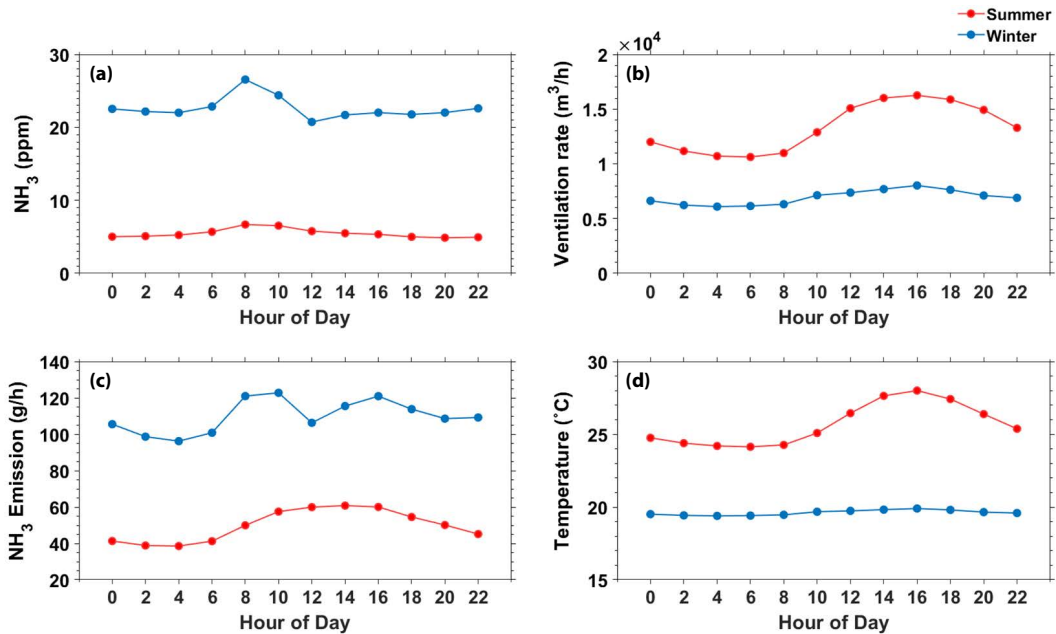


Fig. 4. Diurnal variation of gestating sow house during summer and winter: (a) NH_3 concentration, (b) ventilation rate, (c) NH_3 emission, and (d) indoor temperature.

2645.33 \pm 565.63 g/day로 여름철에 비해 약 2배 이상 높은 것으로 분석되었다. 암모니아 배출량은 환기량 및 암모니아 농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였고, 돈방 내 환기량이 증가하면 암모니아 농도는 감소하는 경향을 보였다. 따라서 여름철과 겨울철의 환기량 차이는 2배, 농도의 차이는 약 4배로 분석되어 최종적인 암모니아 배출량은 약 2배가량 차이를 보였다.

3.2 일변화 경향성

모니터링된 암모니아 농도, 환기량, 암모니아 배출계수 및 온도 데이터의 여름철, 겨울철 일변화 경향성을 그림 4에 도시하였다. 암모니아 농도의 경우, 여름철과 겨울철 모두 8시에 각각 6.68, 26.55 ppm으로 가장 높은 농도를 나타내고 오후 시간대에는 낮은 농도 수준을 보였다(그림 3a). 반면 환기량은 암모니아 농도와 다른 경향성을 나타냈다. 여름철 및 겨울철 환기량은 각각 4시경 최솟값인 10623.13, 6089.96 m^3/h

를 기록한 후 점차 증가하여 16시에 가장 높은 값을 보였다(그림 3b). 이는 일출 이후 내부 온도가 상승함에 따라 환기량이 증가하고, 그와 동시에 돈방 내 축적된 암모니아가 배출되며 입기된 공기가 내부 암모니아 농도를 희석시켜 오후 시간대 낮은 암모니아 농도가 유지되는 것으로 분석되었다(Park *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2008). 한편 암모니아 배출량의 경우 여름철과 겨울철 모두 4시경 최솟값인 38.56, 96.22 g/h을 보였다(그림 3c). 이후 여름철은 14시경 최댓값인 60.78 g/h을, 겨울철은 10시경 최댓값인 122.82 g/h을 기록하였다. 여름철 돈방 내부 온도는 $24\sim 28^\circ\text{C}$ 범위로, 겨울철은 19°C 부근으로 유지되었으며 환기량과 유사한 일변화 경향성을 나타냈다(그림 3d).

3.3 배출계수 산정

측정된 암모니아 농도와 환기량을 통해 각 돈방의 암모니아 배출계수를 산정하였다(그림 5). 실험기간 동안 여름철, 겨울철 모두 1두당 하루에 배출하는 암

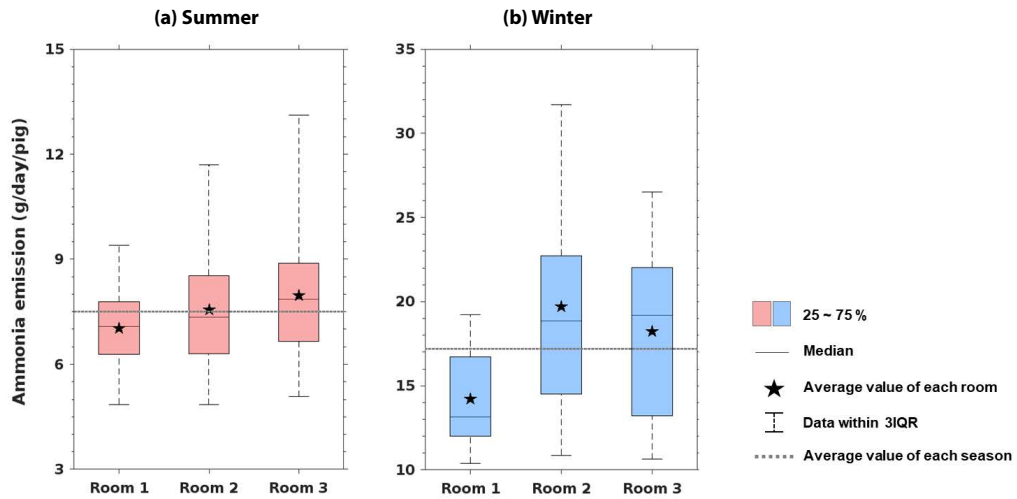


Fig. 5. Box plot of ammonia emission in each room. (a) Summer, (b) Winter.

Table 3. Comparison of NH_3 concentration and NH_3 emissions in gestating sow house.

Type	Sows	Period (day)	NH_3 Conc. (ppm)	NH_3 emissions (g/day/pig)	Reference
Concrete: slatted (1:1)	154~156	92, 74	$5.4 \pm 1.0, 22.4 \pm 4.2$	$7.4 \pm 1.4, 16.9 \pm 4.6$	This study
Straw-bedded	20	18	4.8 ± 1.4	6.3 ± 1.3	(Philippe <i>et al.</i> , 2010)
Straw-bedded	15	18	-	12.8 ± 1.6	(Philippe <i>et al.</i> , 2011)
Straw-bedded	15	18	-	8.4	(Philippe <i>et al.</i> , 2013)
Concrete slat	15	18	4.7	15.8	(Philippe <i>et al.</i> , 2016)
Concrete: slatted (1:1)	154~156	68	8.0 ± 2.7	7.7 ± 1.4	(Park <i>et al.</i> , 2022)

모니아 평균 배출계수는 각각 7.38 ± 1.40 , 16.90 ± 4.59 g/day/pig로 나타났다. 선행연구로부터 보고된 모돈사 내 암모니아 배출계수는 6.3~15.8 g/day/pig로 연구에 따라 다양하게 나타났으며(표 3), 이는 돈사 바닥의 구조와 사육두수, 측정 기간 등 방법론적 차이에 기인한 것으로 보인다. 한편 국내 현행 암모니아 배출계수 중 ‘돈사 내’, ‘모돈’에 해당하는 값은 11.01 kg/year/pig로 (NIER, 2008), 일 배출량으로 환산했을 때(약 30.16 g/day/pig) 본 연구에서 산정된 값보다 약 2~4배 높았다. 기존 연구에서는 암모니아 배출계수 산정 시 1~2일 내외의 짧은 기간 동안 밀폐식 돈사, 개방식 돈사 구분없이 측정이 진행되었다. 또한 암모니아 농도 측정을 위해 밀폐식 돈사에서는 암모니아 전기화학식 센서를 사용했지만, 개방식 돈사에

서는 Chamber법 및 인도페놀법을 사용하였다. 암모니아 분석방법에 따라 검출 결과에 차이가 발생할 수 있으며 (Jo *et al.*, 2020), 앞서 언급된 바와 같이 기존 연구와 본 연구의 수행 조건에 다소 차이가 있어 산정된 배출계수가 상이한 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서 산정된 암모니아 배출계수는 여름철과 겨울철 상이하게 나타났기 때문에 보다 정확한 배출량 산정을 위해서는 기온, 습도와 같은 기상조건을 고려하여 충분한 데이터를 확보한 후, 각 계절별로 암모니아 배출계수를 산정하는 것이 필요하다고 사료된다.

3.4 상관분석

표 4, 표 5는 여름철 및 겨울철 측정된 각 항목(암모니아 농도, 환기량, 암모니아 배출계수, 내부 온도

Table 4. Correlation analysis results of NH₃ concentration, ventilation, NH₃ emission, temperature, and relative humidity in pig room during summer.

Items	NH ₃ concentration	Ventilation	NH ₃ emission	Temperature	Relative humidity
NH ₃ concentration	1	-0.30***	0.51***	-0.20***	0.04***
Ventilation		1	0.62***	0.89***	0.49***
NH ₃ emission			1	0.60***	0.50***
Temperature				1	0.60***
Relative humidity					1

*P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001

Table 5. Correlation analysis results of NH₃ concentration, ventilation, NH₃ emission, temperature, and relative humidity in pig room during winter.

Items	NH ₃ concentration	Ventilation	NH ₃ emission	Temperature	Relative humidity
NH ₃ concentration	1	-0.76***	0.88***	-0.76***	-0.70***
Ventilation		1	-0.46***	0.91***	0.80***
NH ₃ emission			1	-0.54***	-0.57***
Temperature				1	0.90***
Relative humidity					1

*P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001

및 상대습도) 간 상관분석 결과를 나타낸다. 여름철 암모니아 농도는 환기량 ($r = -0.30$)과 내부 온도 ($r = -0.20$)가 상승할수록 농도가 낮아지는 음의 상관관계로 분석되었다. 마찬가지로 겨울철 암모니아 농도는 환기량 ($r = -0.76$)과 내부 온도 ($r = -0.76$)에 대해 음의 상관성을 보였다. 돈사 내부 온도에 의해 배기팬의 가동률이 상승하고, 증가된 환기량으로 인해 내부의 암모니아가 희석되기 때문에 환기량이 높을수록 암모니아 농도는 낮아지게 된다. 이로 인해 암모니아 배출계수는 내부 암모니아 농도 수준과 환기량의 영향을 받으며, 암모니아 농도 수준이 암모니아 배출계수에 영향을 미치는 정도가 계절에 따라 다르게 나타났다. 여름철은 암모니아 농도 ($r = 0.51$) 및 환기량 ($r = 0.62$)이 암모니아 배출계수에 미치는 영향은 비슷했으나 겨울철에는 암모니아 농도 ($r = 0.88$)가 미치는 영향이 환기량 ($r = -0.46$)에 비해 훨씬 큰 것으로 나타났다. 또한 겨울철에는 여름철에 비해 전반적으로 각 변수 간 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 계절적 차이에 의해 암모니아 배출 특성이 달라질 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

본 연구는 여름철과 겨울철 강제환기식 모돈사 내 암모니아 배출량 산정 및 배출 특성을 파악하기 위해 수행되었다. 각 계절마다 돈방 내 암모니아 농도, 환기량, 온도 및 상대습도를 장기간 모니터링 하였으며 (여름철 92일, 겨울철 74일), 수집된 데이터를 기반으로 일변화 경향성을 파악하고 최종적으로 암모니아 배출계수를 산정하였다. 측정결과, 돈방 내 평균온도는 여름철 $25.68 \pm 1.41^\circ\text{C}$, 겨울철 $19.62 \pm 0.86^\circ\text{C}$ 로, 평균 상대습도는 여름철 $87.92 \pm 10.40\%$, 겨울철 약 $36 \pm 12.42\%$ 로 나타났다. 모돈사 내부의 평균 암모니아 농도는 여름철 5.39 ± 0.95 ppm, 겨울철 22.41 ± 4.25 ppm이었으며, 이때의 평균 환기량은 각각 86.07 ± 10.59 , 44.86 ± 6.89 m³/h/pig로 분석되었다. 돈방 내 환기팬의 가동률은 내부 온도에 따라 달라지며, 내부 온도가 높은 여름철에는 상대적으로 더 많은 환기가 이루어지게 된다. 따라서 여름철이 겨울철에 비해 암모니아 농도가 더 낮게 나타났다. 또한 측정기간 동안 각 변수는 뚜렷한 일변화 경향성을 보였다. 여름

철과 겨울철 암모니아 농도는 8시에 최대 농도를 기록한 후 농도가 낮아지며 오후 시간대에 다소 낮은 수준으로 유지되었다. 반면 환기량은 4시경 최솟값을 보이고 점차 증가하여 16시에 가장 높았다. 이는 일출 이후 내부 온도가 상승하며 증가된 환기량으로 인해 축적된 암모니아가 배출되면서 암모니아 농도가 낮아지는 것으로 판단할 수 있다. 각 데이터 간 상관 분석을 수행한 결과, 암모니아 배출계수와 암모니아 농도, 환기량 사이에 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 여름철 및 겨울철 암모니아 농도는 환기량과 내부 온도에 대해 음의 상관성을 보였다. 암모니아 배출계수는 내부 암모니아 농도 수준과 환기량의 영향을 받으며, 암모니아 농도 수준이 암모니아 배출계수에 영향을 미치는 정도가 계절에 따라 달랐다.

본 연구에서 여름철, 겨울철 모돈 1두당 하루에 배출하는 평균 암모니아 배출계수는 각각 7.38 ± 1.40 , 16.90 ± 4.59 g/day/pig로 산정되었다. 돈사 내 암모니아 배출특성 및 배출계수는 여름철과 겨울철 상이하게 나타났으며, 보다 대표성 있는 모돈사 내 암모니아 배출계수를 산정하기 위해서는 각 계절별로 암모니아 배출 특성을 고려하는 것이 필요하다고 사료된다. 뿐만 아니라 국내의 현행 암모니아 배출계수는 공인된 프로토콜의 부재와 짧은 측정기간 등으로 다소 과대평가되었을 가능성이 존재하므로, 확립된 방법론에 따른 돈사 유래 암모니아 배출 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구과제(PJ01601902)와 국립축산과학원 전문연구원 과정 지원사업에 의해 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Behera, S.N., Sharma, M. (2012) Transformation of atmospheric ammonia and acid gases into components of PM_{2.5}: An environmental chamber study, *Environmental Science and Pollution Research*, 19(4), 1187-1197. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0635-9>
- Bobrowski, A.B., Willink, D., Janke, D., Amon, T., Hagenkamp-Korth, F., Hasler, M., Hartung, E. (2021) Reduction of ammonia emissions by applying a urease inhibitor in naturally ventilated dairy barns, *Biosystems Engineering*, 204, 104-114.
- Brunekreef, B., Holgate, S.T. (2002) Air pollution and health, *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242.
- Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fangueiro, D., Cardenas, L., Amon, B., Misselbrook, T. (2011) Manure management: Implications for greenhouse gas emissions, *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 514-531. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.036>
- Eurostat. Your Key to European Statistics (2020) Available online: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (accessed on Oct. 06, 2022).
- Faber, A., Jarosz, Z., Żyłowski, T. (2019) Verification of the possibilities to reduce ammonia emission for various slurry application practices in Poland, *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie-Problemy Rolnictwa Światowego*, 19(2), 31-40. <https://doi.org/10.22630/PRS.2019.19.2.21>
- 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 & Technology*, 49(8), 4834-4841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00008>
- Horne, J.R., Zhu, S., Montoya-Aguilera, J., Hinks, M.L., Wingen, L.M., Nizkorodov, S.A., Dabdub, D. (2018) Reactive uptake of ammonia by secondary organic aerosols: Implications for air quality, *Atmospheric Environment*, 189, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.021>
- Jang, Y., Ha, T., Song, M., Seo, S., Jung, M., Kwon, K-s. (2021) Characteristic of atmospheric ammonia in swine breeding area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 853-861, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.853>
- Jang, Y., Jo, G., Seo, S., Jung, M. (2020) A comparison study of odor characteristics according to swine facilities, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 19(1), 74-84, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2020.19.1.74>
- Jo, G., Ha, T., Jang, Y., Seo, S., Jung, M. (2020) A study on ammonia emissions characteristics during growing period of pigs in facility with mechanical ventilation system,

- Journal of Odor and Indoor Environment, 19(1), 1-10, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14397/jals.2020.54.3.63>
- Jo, G., Hwang, O., Jung, M., Han, D., Woo, S., Ha, T., Seo, S., Jang, Y., Lee, S. (2020) Comparison of analytical methods for the measurement of atmospheric ammonia, Journal of Odor and Indoor Environment, 19(2), 137-148, (in Korean with English abstract).
- Jo, G., Jang, Y., Ha, T., Woo, S., Jung, M. (2020) Ammonia emission characteristics during the finishing periods of pigs housed with mechanical ventilation system, Journal of Agriculture & Life Science, 54(3), 63-71, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14397/jals.2020.54.3.63>
- Korea Ministry of Environment (MOE) (2020) Statistics of Livestock manure treatment.
- Kristensen, H.H., Wathes, C.M. (2000) Ammonia and poultry welfare: A review. World's Poultry Science Journal, 56(3), 235-245. <https://doi.org/10.1079/WPS20000018>
- Kriz, P., Kunes, R., Smutny, L., Cerny, P., Havelka, Z., Olsan, P., Xiao, M., Stehlik, R., Dolan, A., Bartos, P. (2021) Methodology for measurement of ammonia emissions from intensive pig farming, Agriculture, 11(11), 1073. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111073>
- Lee, S., Lee, E. (2010) Emission characterization of ammonia produced from swine nightsoil, Microbiology and Biotechnology Letters, 38(3), 308-314, (in Korean with English abstract).
- Mosquera, J., Monteny, G.J., Erisman, J.W. (2005) Overview and assessment of techniques to measure ammonia emissions from animal houses: The case of the Netherlands, Environmental Pollution, 135(3), 381-388. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.11.011>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2008) Estimating Ammonia Emissions in Atmosphere and Constructing an Inventory.
- Park, J., Park, S., Woo, S., Hwang, O., Jung, M., Jo, G. (2022) A study on the characteristics of ammonia emission in mechanically-ventilated sow housing during spring in Korea, Journal of Odor and Indoor Environment, 21(1), 23-31. <https://doi.org/10.15250/joie.2022.21.1.23>
- Philippe, F.X., Canart, B., Laitat, M., Wavreille, J., Bartiaux-Thill, N., Nicks, B., Cabaraux, J.-F. (2010) Effects of available surface on gaseous emissions from group-housed gestating sows kept on deep litter, Animal, 4(10), 1716-1724.
- Philippe, F.X., Laitat, M., Wavreille, J., Bartiaux-Thill, N., Nicks, B., Cabaraux, J.F. (2011) Ammonia and greenhouse gas emission from group-housed gestating sows depends on floor type, Agriculture, Ecosystems & Environment, 140(3), 498-505. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.018>
- Philippe, F.X., Laitat, M., Wavreille, J., Nicks, B., Cabaraux, J.-F. (2013) Influence of permanent use of feeding stalls as living area on ammonia and greenhouse gas emissions for group-housed gestating sows kept on straw deep-litter, Livestock Science, 155(2-3), 397-406.
- Philippe, F.X., Laitat, M., Wavreille, J., Nicks, B., Cabaraux, J.-F. (2016) Floor slot openings impact ammonia and greenhouse gas emissions associated with group-housed gestating sows, Animal, 10(12), 2027-2033.
- Russell, A.G., Brunekreef, B. (2009) A focus on particulate matter and health. ACS Publications.
- Sapek, A. (2013) Emisja amoniaku z rolnictwa w Polsce, Zagadnienia Ekonomiki Rolnej, 2, 114-123.
- Seo, S., Park, J., Jang, Y., Ha, T., Kwon, K.-s., Jung, M. (2021) A study on ammonia emission characteristics in naturally ventilated hanwoo-barn, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 37(6), 919-930. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.919>
- Sonntag, D. (1990) Import new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae, Meteorologische Zeitschrift, 70, 340.
- Sun, G., Guo, H., Peterson, J., Predicala, B., Laguë, C. (2008) Diurnal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide emission profiles of confined swine grower/finisher rooms, Journal of the Air & Waste Management Association, 58(11), 1434-1448.
- Tabase, R.K., Millet, S., Brusselman, E., Ampe, B., De Cuyper, C., Sonck, B., Demeyer, P. (2020) Effect of ventilation control settings on ammonia and odour emissions from a pig rearing building, Biosystems Engineering, 192, 215-231. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.022>
- Verification of Environmental Technologies for Agricultural production (VERA) (2018) VERA Test Protocol for Livestock Housing and Management Systems. In: International VERA Secretariat Delft, The Netherlands.
- Wang, S., Xing, J., Jang, C., Zhu, Y., Fu, J.S., Hao, J. (2011). Impact assessment of ammonia emissions on inorganic aerosols in East China using response surface modeling technique, Environmental Science & Technology, 45(21), 9293-9300. <https://doi.org/10.1021/es2022347>
- Wang, Y.-C., Han, M.-F., Jia, T.-P., Hu, X.-R., Zhu, H.-Q., Tong, Z., Lin, Y.-T., Wang, C., Liu, D.-Z., Peng, Y.-Z., Wang, G., Meng,

- J., Zhai, Z.-X., Zhang, Y., Deng, J.-G., Hsi, H.-C. (2021) Emissions, measurement, and control of odor in livestock farms: A review, *Science of The Total Environment*, 776, 145735. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145735>
- Yang, K., Jang, D., Kwon, K., Ha, T., Kim, J., Lee, Kim, J.-K. (2022). Comparative of welfare level of animal welfare certified farms and general group housing farms, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 23(1), 578-586, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.1.5>
- Zhang, L., Chen, Y., Zhao, Y., Henze, D.K., Zhu, L., Song, Y., Paulot, F., Liu, X., Pan, Y., Lin, Y., Huang, B. (2018) Agricultural ammonia emissions in China: reconciling bottom-up and top-down estimates, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(1), 339-355. <https://doi.org/10.5194/acp-18-339-2018>
- Zhuang, S., Brusselman, E., Sonck, B., Demeyer, P. (2020) Validation of five gas analysers for application in ammonia emission measurements at livestock houses according to the vera test protocol, *Applied Sciences*, 10(15), 5034. <https://doi.org/10.3390/app1015034>

Authors Information

- 박소연(국립축산과학원 축산환경과 전문연구원)
(soyeon97@korea.kr)
- 정민웅(국립축산과학원 축산환경과 농업연구관)
(mwjung@korea.kr)
- 서시영(국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)
(seosi@korea.kr)
- 우샘이(국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)
(znf12345@korea.kr)
- 황옥화(국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)
(hoh1027@korea.kr)
- 조슈아나이젤할더(국립축산과학원 축산환경과 전문연구원) (joshua2021@korea.kr)
- 장유나(전북지방환경청 환경관리과 환경연구사)
(jyn0316@korea.kr)
- 조광곤(금강유역환경청 측정분석과 환경연구사)
(ggjo@korea.kr)
- 박준수(국립축산과학원 축산환경과 농업연구사)
(karmon2@korea.kr)