



겨울철 강제환기식 돈사 내 온실가스 (CH₄, N₂O) 배출 특성 연구

Emission Characteristics of Greenhouse Gases (CH₄, N₂O) in Mechanically Ventilated Swine Farm during Winter Season

박준용^a · 정민웅^b · 조광곤^c · 장유나^{d,†}
Park, Junyong · Jung, Minwoong · Jo, Gwanggon · Jang, Yu-Na

ABSTRACT

The emission characteristics and emission factors were determined by measuring the concentration of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), the amount of ventilation, etc. in the two fattening rooms which have the same environment in winter. As a result of monitoring, the average concentration of CH₄ and N₂O was 20.7-26.7 ppm and 1.4-1.6 ppm. The average temperature inside the room was measured at 20.0-21.4°C, and the average ventilation was 1345.4-1567.3 m³/h. The daily emission of CH₄ for the first 30 days showed a constant emission of 3.6-8.2 g/d/m²/pig, but thereafter, the emission increased rapidly. The daily emission of N₂O was 0.7-1.3 g/d/m²/pig, showing stable emission during the test period, and relatively insignificant emission compared to the emission of CH₄. After repeated test, it was confirmed that there was no significant difference between the two rooms. As a result, the CH₄ 6.21 g/d/m²/pig and N₂O 1.02 g/d/m²/pig average emission for each room was derived.

Keywords: Emission factor; greenhouse gas; mechanical ventilation; swine; winter

1. 서론

온실가스란 지구를 둘러싸고 있는 기체 중 온실효과를 유발하는 가스를 말하며, 이들은 지구환경 유지에 없어서는 안 될 중요한 요소이다. 하지만 산업 발전 등으로 인해 온실가스의 배출량이 점차 과도하게 증가함으로써 지구온난화, 기후변화 등의 심각한 문제를 일으키고 있다. 온실가스 배출은 산업뿐만 아니라 축산업에서도 상당량의 발생되고 있는데 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)에 따르면, 축산업에서 발생하는 온실가스가 산업·운송 수단에서 배출되는 온실가스와 비슷한 수준 (13%)이라고 보고하고 있다. 또한, FAO (2017)에서는 축산업에서 16.5%의 수치를 제시하였고 그 중 배출량의 63%가 가축의 장내발효, 분뇨, 분뇨

처리에서 발생됨을 보고하였다. 그리고 최근 Cardador et al. (2020)는 가축에서 온실가스 배출량은 전 세계적으로 지구 온난화 효과에 14.5%에서 50.0%까지 차지할 수 있다고 하였다. 축산업에서의 온실가스 배출원 중 메탄 (CH₄, methane)은 이산화탄소 (CO₂, carbon dioxide) 다음으로 가장 많이 방출되며 특히, CH₄은 아산화질소 (N₂O, nitrous oxide)와 함께 지구온난화지수 (Global Warming Potential; GWP) 대비 CO₂보다 각각 28배, 265배로 기후변화에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다 (IPCC, 2014). 따라서 산업 외에도 축사 내·외부, 슬러리 피트에서 미생물과 연관되어 배출되는 온실가스 연구들이 다양하게 국·내외에서 수행되고 있다 (Kam et al., 2011; Jeong et al., 2017; Shin et al., 2019; Zhuang et al., 2020).

축산업에서 발생하는 온실가스는 가축의 장내 발효와 분뇨의 저장 및 후숙 관리 과정에서 많이 발생하고 있다 (Massé et al., 2008). 국내 대다수의 농가에서는 돈사 내부 피트에 분뇨를 저장한 후 처리시설로 이동시키고 있으며, 저장기간 동안 CO₂, CH₄, N₂O와 같은 온실가스가 발생된다 (Amon et al., 2006; Dai and Blanes-Vidal, 2013; Wang et al., 2014). 현재 축산 선진국에서는 UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)에 제출할 국가 고유 데이터 구축을 위해 지속적으로 온실가스 배출량 평가를 수행하고 있다. 선진국의 온실가스별 국가 고유 배출계수 적용 비율 중 축산과 관련된 CH₄와 N₂O는 국가별로 43 ~ 87%의 고유 배출계수를 적용하고 있지만 국내에서의 적용률은 CH₄은 7%, N₂O

^a Researcher, Division of Animal Environment, National Institute of Animal Science (NIAS)

^b Senior Researcher, Division of Animal Environment, National Institute of Animal Science (NIAS)

^c Researcher, Geum River Basin Environment Office, Ministry of Environment

^d Researcher, Division of Animal Environment, National Institute of Animal Science (NIAS)

† Corresponding author

Tel.: +82-63-238-7435, Fax: +82-63-238-7447

E-mail: jyn0316@korea.kr

Received: March 17, 2021

Revised: June 07, 2021

Accepted: June 07, 2021

는 27%로 매우 낮은 수준이다. 이에 따라 국내에서도 축산업 내 온실가스 배출량에 대한 감축과 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 계획을 발표했다 (Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 2014). 국내 온실가스 배출량 산정 정확성을 높이고, 국가 고유계수 적용률을 점진적으로 증대하기 위해 수행하였지만, 현재 축산부문 국내 고유배출계수 개발은 매우 미미한 실정이다.

따라서 본 연구는 국내 고유배출계수 개선 연구의 일환으로 겨울철 비육돈사에서 온실가스의 농도, 환기량, 온도를 실시간으로 측정하여, 온실가스 배출량 및 배출계수를 산정하고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 시험 돈사구조 및 사육환경

실험은 돈방 내 복도를 기점으로 4개의 pen (5.55 × 2.08 m)이 마주보고 있는 독립된 구조의 동일한 돈방 2곳 (room A, B)에서 수행되었다 (Fig. 1(a)). 각 돈방의 입기는 중천장을 통과한 외부 공기가 돈방 내부로 유입되며, 배기는 돈방 중앙 단일 천장판을 통해 이루어지는 강제환기식 구조의 시스템이다 (Fig. 1(b)). 분뇨 처리방식은 슬러리 피트 형태로 분뇨를 저장하고 (피트 깊이: 0.45 m), 바닥구조는 concrete floor와

plastic slatted floor가 1:1로 비율이었다. 돈사 내 피트 관리는 돼지의 일괄 입식 (all-in) 전 슬러리를 모두 배출하였고, 수세를 실시하였다. 또한, 돼지 입식 후 분뇨는 지속적으로 피트 내부에 저장되며 출하 시까지 배출되지 않았다. 입식된 돼지 (평균체중: 30.3 kg)는 물과 사료를 자유채식 하였으며, 육성기 (5주)와 비육기 (6주) 후 일괄 출하 (평균체중: 91.7 kg) 되었다.

실험 돈방 별 사육 두수는 room A 96마리, room B 102 마리였으며, 사육밀도는 평균 1.01 m²/pig 였다 (Table 1). 시험은 육성기가 끝난 후 비육 시점부터 출하까지 진행하였으며 (1/2 - 2/20, room A, B: 43일), 각 돈방별로 CH₄와 N₂O의 농도, 환기량, 온도를 실시간으로 모니터링하였다.

Table 1 Performance of pigs during the fattening period of two rooms

Parameter	Room A	Room B
Rearing period	1/2 - 2/13	1/9 - 2/20
Number of pigs	96	102
Stock density (m ² /pig)	1.04	0.97
Initial weight (kg)*	29.1	31.5
Final weight (kg)	92.3	91.1

* Initial weight for growing period

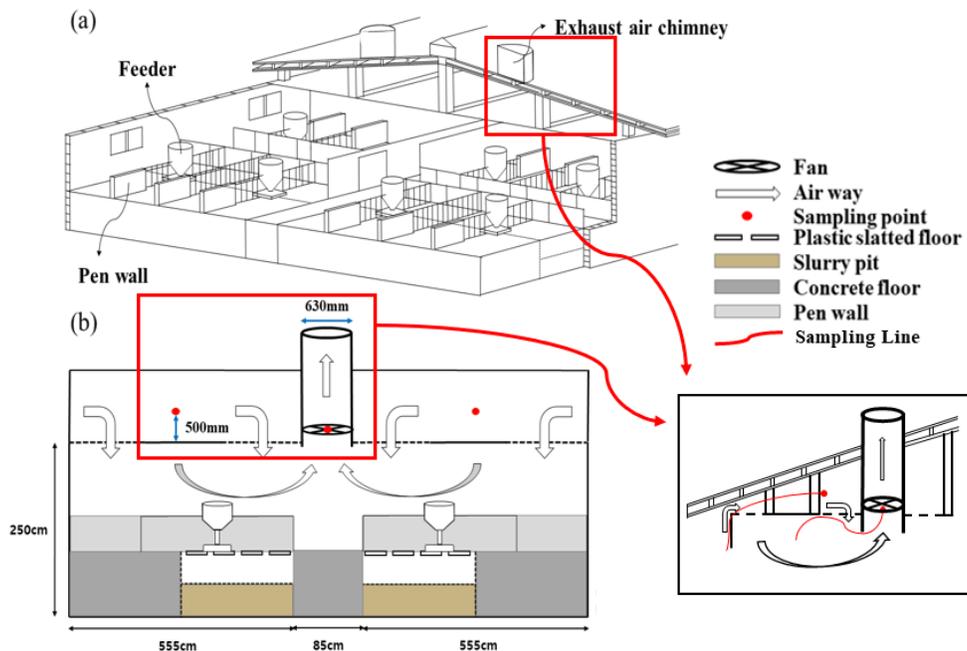


Fig. 1 Schematic diagram of experimental pig farm. (a) inside the pig farm, (b) mechanical ventilation pathway of side view

2. 온실가스 (CH₄, N₂O) 및 환경조건 모니터링

온실가스 농도의 측정은 광음향분광 가스 모니터링 시스템 (INNOVA 1512, LumaSense Technologies, Denmark) 및 멀티 포인트 샘플러 (INNOVA, 1409, LumaSense Technologies, Denmark)를 활용하여 돈방 내 입기구 (중천장) 및 배기구 (환기팬 출구)에서 실시간 모니터링하였다. 먼지 및 수분으로부터 측정기 보호를 위해 샘플링 전단에 자체 제작한 glass wool 필터 및 수분필터 (TPC Mechatronics Corp., PF2-02BD)를 설치하였으며, 샘플링 라인에는 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 튜브를 사용하였다. 현장 실측 전 측정기의 교정 및 성능 검증을 위해 고순도 질소 (Rigas 99.999%, Daejeon, Korea)를 이용하여 바탕값의 교정을 실시하였으며, CH₄ 표준가스 (Rigas 502 μmol/mol, Daejeon, Korea), N₂O 표준가스 (Rigas 1.09 μmol/mol, Daejeon, Korea)를 이용하여 단포인트 교정을 수행하였다. 측정은 1회/분으로 수집되었으며, 매시간 각 측정위치에서 10회 채취 후 6-10회 측정값을 평균농도로 사용하였다 (Jo et al., 2020a).

환기팬 가동률 (입력전압/정격전압)과 온도는 돈사 자체 관제시스템에 의해 실시간 (1회/분)으로 수집하였으며 1시간 평균값을 이용하였다. 환기팬 가동률에 따른 환기량 산정을 위해 미국냉난방공조기술자학회 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE)에서 제시하고 있는 기준에 적합하게 제작된 소형 환기량 측정장치를 이용하여 배기구 (Vostermans Ventilation BV Multifan 4E50 (Ø630), Venlo, Netherlands)에 부착하였다. 가동률 (30, 50, 70, 100%)에 따라 환기량 측정장치 내 다수의 홀을 통해서 배기되는 공기유체의 전압 (P_t , kg/m/s²)과 정압 (P_s , kg/m/s²)의 차를 차압측정기 (TSI, DP-Calc 5825, US)로 측정하여 동압 (P_d , kg/m/s²)를 계산하였다 (ASHRAE 1993). 이후 계산된 동압과 공기밀도 (ρ 1.2 kg/m³)로 나눠 주고, 측정부의 면적 (A , m²)을 곱하여 시간별 환기량 (V_{flow} , m³/h)으로 환산하였다 (식 (1), (2)). 실측구간 외 결측 구간의 환기량 추정을 위해 증가함수인 logistic regression 회귀모델을 사용하여 회귀선을 도출하였고, 관제시스템에서 수집되는 팬 가동률을 대입하여 환기량을 산출하였다 (Jo et al., 2020b). 그 결과 환기팬 가동률이 30~100%일 때 환기량은 room A 1,372~4,145 m³/h, room B 1,260~4,428 m³/h였으며, 실제 농장에서 운용되지 않는 30% 이하는 측정에서 제외하였다.

$$P_d = P_t - P_s \quad (1)$$

$$V_{flow} = A \times \sqrt{\frac{2 \times P_d}{\rho}} \times 3600 \quad (2)$$

3. 배출계수 산정

본 연구에서는 steady state chamber를 기반으로 한 mega chamber 법을 차용하여 밀폐형 돈방을 하나의 챔버의 형태로 가정하였다 (Brown et al., 2000; Thompson et al., 2003). 1시간 간격으로 수집된 CH₄와 N₂O의 순발생 농도 (ΔC , 배기구 온실가스 농도 (C_{out} , ppm) - 입기구의 온실가스 농도 (C_{in} , ppm))에 환기량 ($Flow\ rate$, m³/h)을 곱한 후, 돈사 면적 ($Area$, m²) 및 사육두수 (n)로 나누면 단위면적당, 돼지마리당, 시간단위당 배출되는 온실가스의 배출계수 (E_{gas} , mg/m²/h/pig)를 산정할 수 있다. 아래 식에서 압력은 표준압력 (P , 101,325 kg/m/s²)으로 가정하였으며, 분자량 (M , kg/kmol), 유니버설가스상수 (R , 8.314×10³ Pa · m³/kmol/K), 온도 (T , K)를 고려하여 산출하였다.

$$E_{gas} = Flow\ rate \times \frac{\Delta C}{Area \times n} \times \frac{P \times M}{R \times T} \quad (3)$$

산정된 단위면적당, 돼지마리당, 시간단위당 온실가스 배출계수를 이용하여 배출량을 1일 단위로 산출한 후 사육일수로 나누어 g/pig/day/m² 단위로 최종 온실가스 배출계수를 산정하였다. 또한 최종 산출된 배출계수 (E_{gas})의 CO₂ 1 kg의 영향 비율로 환산하여 온실가스 영향에 대한 상대적 비교를 위하여, IPCC (2014)에서 제시하고 있는 GWP (CH₄: 28, N₂O: 265)을 적용하여 CO₂ 환산량 (CO_{2eq} , Carbon dioxide equivalent)을 계산하여 비교하였다 (식 (4)).

$$CO_{2-eq} = E_{gas} \times GWP_{gas} \quad (4)$$

4. 통계분석

본 연구에서는 통계량의 유의차 및 상관성 조사를 위해 통계 소프트웨어 Jamovi (Version 1.2.16)를 이용하여 통계분석을 수행하였다. 분석된 데이터에 Shapiro-Wilk test와 Kolmogorov-Smirnov test를 적용하여 정규성 검정 (normality test)을 수행하였다 ($p > 0.05$; 정규분포 가정). 검정결과 정규분포를 하나라도 만족하지 못하는 그룹의 경우 비모수검정인 Spearman's correlation method ($p < 0.05$; 그룹 간 유의미한 상관관계 있음)로 상관관계를 분석하였다. 또한, 각 돈방 별 온실가스 배출량 그룹 간 평균 차이 검정을 위해 정규분포의 경우 Student's T-test, 비정규분포일 경우 Wilcoxon rank test를 실시하였다 ($p\text{-value} > 0.05$: 그룹 간 평균 차이 없음).

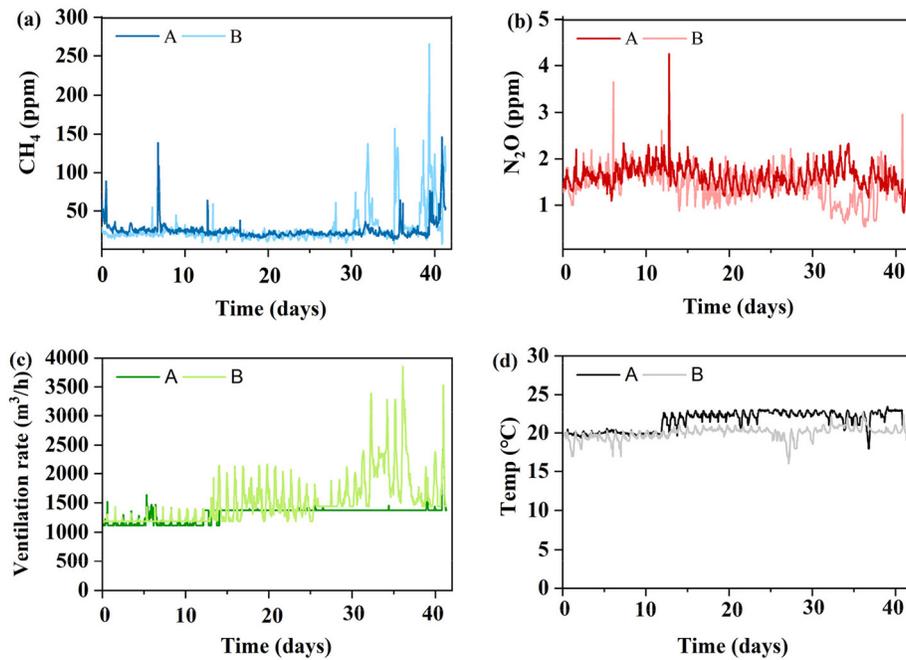


Fig. 2 Hourly monitoring result of greenhouse gas and environmental conditions, (a) methane concentration, (b) nitrous oxide concentration, (c) ventilation rate, (d) indoor temperature (A: room A, B: Room B)

III. 결 과

1. 모니터링 결과

가. 온실가스 및 환경조건 모니터링

Fig. 2에 비육기간 43일간 CH₄, N₂O의 순발생 농도, 실내 온도, 환기량의 시간별 측정 결과를 그래프로 나타내었다. 측정 기간 동안 각 돈방의 CH₄의 평균 농도는 Room A, Room B에서 각각 20.7±15.3, 26.7±22.7 ppm으로 나타났고, 최대 농도는 176.3, 265.9 ppm으로 관측되었다. N₂O의 평균 농도는 각각 Room A, Room B에서 1.6±0.3, 1.4±0.4 ppm으로 측정되었고, 최대농도는 4.3, 3.7 ppm로 나타났다. Zong et al. (2015)는 겨울철 비육돈사에서 관측되는 CH₄, N₂O의 평균농도를 각각 약 20.0, 0.3 ppm으로 보고하였고, 본 시험 결과보다 유사하거나 약간 낮은 수준이었다.

돈방 내 평균 온도는 Room A, Room B가 각각 21.4±1.3, 20.0±0.8°C로 일정한 수준으로 실내 온도를 유지하는 것으로 나타났다. 돈방 별 환기량은 Room A 1345.4±223.7 m³/h, Room B 1567.3 ± 434.2 m³/h로 Room B의 환기량이 A에 비해 다소 높은 수준으로 관측되었는데, 이는 본 연구 시험 돈방의 환경에 따라 환기시스템의 개별적인 운영에 따른 차이로 사료된다. 본 시험에서 돼지 한 마리당 환기량은 평균 14.7 m³/h/pig (Room A 14.0 m³/h/pig, Room B 15.4 m³/h/pig)로 분석되었다.

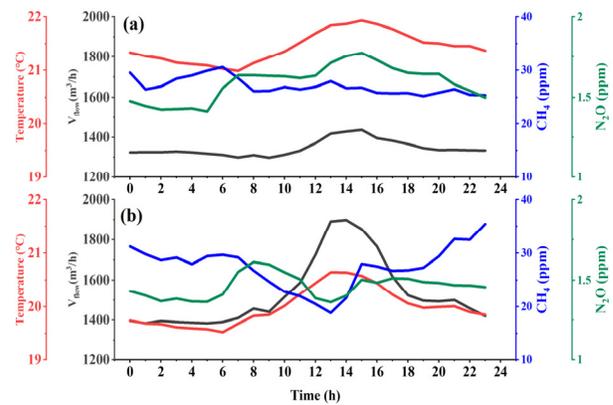


Fig. 3 Diurnal graph of greenhouse gases concentration and environmental conditions, (blue line) methane concentration, (green line) nitrous oxide concentration, (black line) ventilation rate, (red line) temperature, (a) room A, (b) Room B

나. 일변화 경향

시험 기간 동안 Room A, B의 온실가스 농도 (ΔC), 환기량, 온도 및 시간평균 배출량의 일변화 경향을 Fig. 3에 도식화하였다. 돈방 별 온도는 Room A 21.0~21.9°C, Room B 19.5~20.6°C의 범위를 나타내었으며, 13~15시 사이에 최고 온도, 6~7시 사이에 최소 온도를 기록하였다. 돈방 별 환기량의 경우에는 Room A 1,297.6~1,436.9 m³/h, Room B 1,383.2~1,898.3

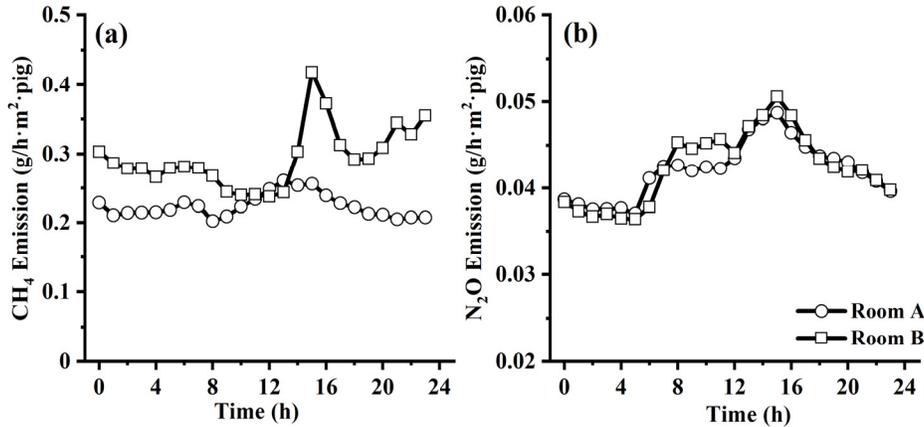


Fig. 4 Diurnal graph of emission in each room. (a) methane, (b) nitrous oxide

m³/h의 범위로 측정되었으며, 돈방 온도와 유사하게 14~15시 사이에 최고 환기량을 보였다. 반면에 최소 환기량 값은 Room A 9시, Room B 1시로 측정되었다. 온도와 환기량은 유사한 일변화 경향으로 관측되었고, 상관관계 분석 결과 또한 Room A $r=0.922$, Room B $r=0.971$ 로 높은 상관성을 보였다. 이는 일반적으로 환기팬 가동을 설정 시 돈방 내부 온도가 변수로 적용되기 때문이다. 따라서, 본 연구와 동일한 돈사 및 방법론이 적용된 선행연구의 하절기 비육돈사의 환기량 범위 (1,621.8~3,794.7 m³/h)에 비해 본 연구의 동절기 환기량은 매우 낮게 분석되었다 (Jo et al., 2020c). 온실가스 농도는 CH₄의 경우 Room A 25.2~30.6 ppm, Room B 18.8~35.4 ppm의 범위로 나타났으며, N₂O는 Room A 1.4~1.8 ppm, Room B 1.4~1.6 ppm로 관측되었다.

측정된 온실가스의 단위 면적당, 돼지 마리 당 시간평균 발생량을 Fig. 4에 나타내었다. 시간평균 온실가스 발생량 범위는 CH₄은 Room A 0.20~0.26 g/h/m²/pig, Room B 0.24~0.42 g/h/m²/pig, N₂O는 Room A 0.037~0.049 g/h/m²/pig, Room B 0.036~0.051 g/h/m²/pig로 나타났으며, Room B가 Room A에 비해 상대적으로 높은 발생량을 보였다. Room A, B는 동일 시험 조건이나 사육두수의 차이로 사육 마리수가 더 많은 Room B에서의 발생량이 상대적으로 높게 산정된 것으로 사료된다. 온실가스 시간 평균 발생량은 13~15시 사이에 최댓값으로 관측되었으나 최솟값은 불규칙하게 나타났다. Room B에서 CH₄의 14~17시 사이 피크를 제외하고 각 온실가스의 일변화 패턴은 유사한 패턴으로 분석되었다.

2. 온실가스 배출

가. 온실가스 배출량

Fig. 5는 비육기간 동안 배출된 단위 면적당, 돼지 마리당

일별 온실가스 배출량 표시한 그림이다. 시험기간 동안 CH₄의 일별 배출량은 Room A 3.7~20.3 g/d/m²/pig, Room B 3.6~23.5 g/d/m²/pig의 범위로 나타나 최소 배출량과 최대 배출량의 차이가 크게 분석되었다. Room A, B 모두 비육 기간 30일까지 Room A 3.9~8.2 g/d/m²/pig, Room B 3.6~5.9 g/d/m²/pig 범위로 일정한 배출량을 보였으나, 이후 일별 CH₄ 발생량이 증가하였다. 특히, Room B에서는 증가 양상이 Room A에 비해 뚜렷하게 분석되었다. 선행연구에서는 피트와 분뇨 표면 사이의 빈 공간 (headspace)이 작을수록, 피트에 저장된 분뇨의 깊이가 깊을수록 CH₄의 배출량 증가를 보고하였다 (Ye et al., 2009; Dong et al., 2011). 본 연구의 돈사 피트 내 가축분뇨는 시험기간 동안 배출되지 않아 분뇨 깊이는 깊어지고 headspace의 부피는 작아져 CH₄ 발생량이 증가하였을 것으로 판단된다. 또한, Park et al. (2010)은 CH₄ 배출량 증가를 피트 내 분뇨의 저장기간이 길어질수록 유기산이 축적되고, 이를 CH₄ 생성균이 기질로 이용하기 때문으로 보고하였다. 이처럼 돈사 피트 내 저장기간이 경과함에 따라 피트 내 혐기적환경에 의해 미생물 (CH₄ 생성균)이 증식하고 CH₄의 발생량이 증가하였을 것으로 사료된다 (Lin et al., 1993; Park et al., 2005). 따라서 CH₄의 발생량 증가는 시험기간 동안 저장되는 분뇨 양의 증가로 판단되지만, 제한된 시험 결과 내에서의 해석으로 추가적인 연구가 필요하다.

N₂O의 단위 면적당, 돼지 마리당 일별 배출량은 Room A 0.8~1.3 g/d/m²/pig, Room B 0.7~1.3 g/d/m²/pig의 범위로 나타나 시험 기간 동안 안정된 배출을 보였으며, CH₄의 배출량에 비해 상대적으로 미미하였다. 저장된 분뇨로부터 기원되는 N₂O는 질산화 (nitrification), 탈질화 (denitrification), 암모니아산화 (anammox) 과정 중 중간 생성물로 발생된다고 알려져 있다 (Poth and Focht, 1985; Oenema et al., 2005; Kebreab et al., 2006). 특히 N₂O의 합성은 호기와 혐기의 혼합된 상태

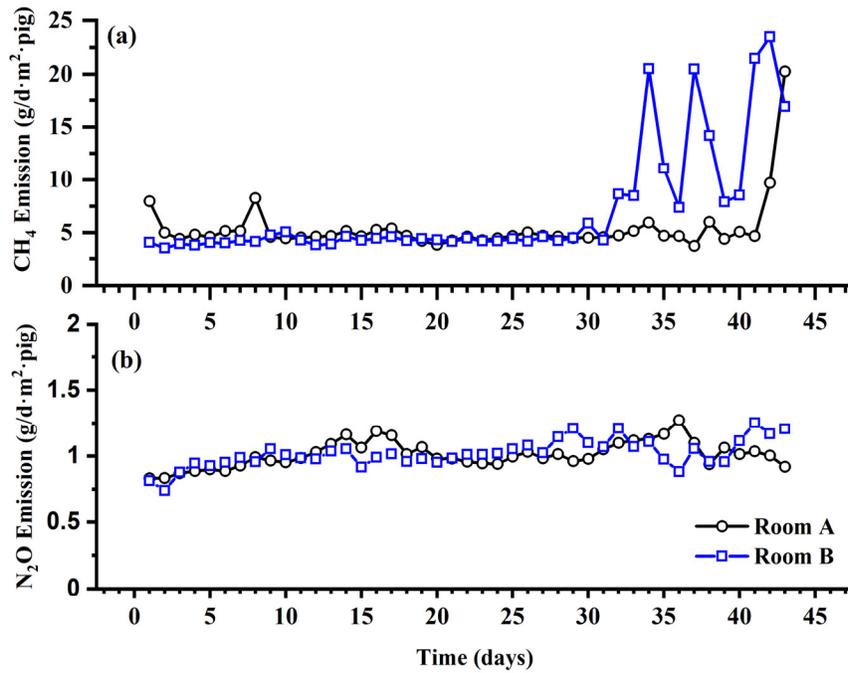


Fig. 5 Daily graph of emission in each room, (a) methane, (b) nitrous oxide

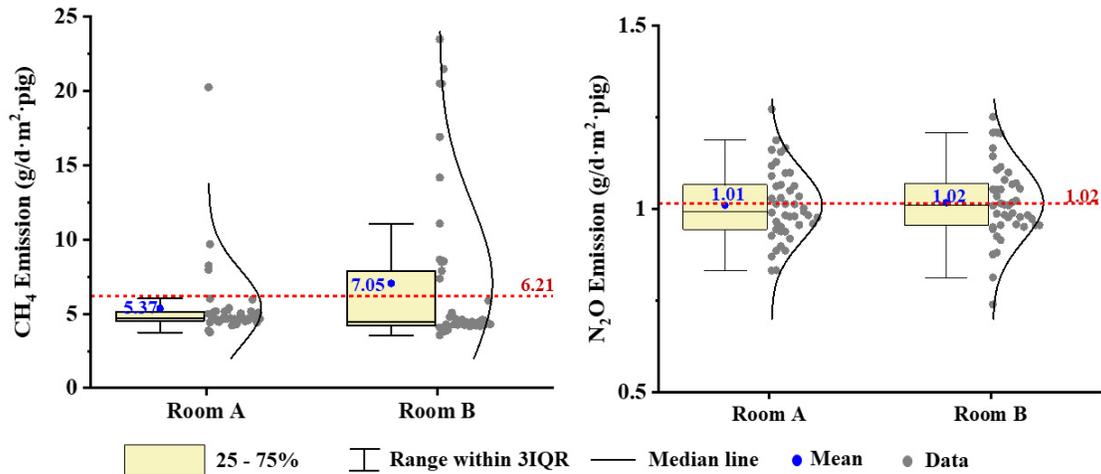


Fig. 6 Box-plot and distribution curve of daily green house gases emission in each room. In addition, the emission factor calculated as the average of the two rooms is represented by the red dash line

에서 이루어지지만, 이와 같은 조건은 가축분뇨 (슬러리)에서는 드문 현상으로 보고되고 있다 (Monterny et al., 2006; Cabaraux et al., 2009; Philippe and Nicks, 2015). 본 연구의 가축분뇨는 피트 내부에서 혐기성 상태로 저장되고 있어, N₂O의 발생량이 낮은 것으로 판단된다.

나. 온실가스 배출계수

각 돈방에서 모니터링 된 온실가스 농도, 환기량, 온도를 고려하여 배출량을 산정하고 사육두수 및 단위면적으로 나누

어 배출계수를 산정하였다 (Fig. 6). 돈방별 CH₄의 배출계수는 Room A 5.37 g/d/m²/pig, Room B 7.05 g/d/m²/pig로 산정되었으며, Wilcoxon rank test 결과 두 돈방 평균에 유의적 차이가 없음을 확인하였다 (p>0.05). 또한 N₂O 배출계수는 Room A 1.01 g/d/m²/pig, Room B 1.02 g/d/m²/pig로 도출되었으며, Student's T-test 수행을 통해 두 배출계수 그룹 간 평균의 차이가 없음을 확인하였다 (p>0.05). 따라서, 각 돈방의 평균값인 CH₄ 6.21 g/d/m²/pig, N₂O 1.02 g/d/m²/pig를 본 연구의 온실가스 배출계수로 산정하였다. 유사한 온도 범위 (15.6~20.8°C)

에서 수행된 선행 연구 (32~102마리, 27~121.0 kg)의 CH₄의 배출계수 범위 (1.2~7.92)에 적용되는 결과를 보였으며, N₂O (0.0~0.7)는 다소 높은 결과를 보였다 (Dong et al., 2009; Ngwabie et al., 2011; Zong et al., 2015). 다만, 해외의 경우 국내 사육방식과 달리 육성과 비육기를 따로 구분하고 있지 않아 직접적인 비교는 어려울 것으로 사료된다.

산정된 온실가스 배출계수를 GWP를 적용하여 CO₂eq으로 산출한 결과 CH₄, N₂O가 각각 173.9 gCO₂eq, 270.3 gCO₂eq로 나타났다. CO₂eq 결과 값이 CH₄에 비해 N₂O가 약 1.55배 높게 나타났으며, 이는 돈사에서 발생하는 N₂O의 농도 및 배출량은 낮지만 온실가스로서의 기여도는 높음을 시사한다.

IV. 결론

겨울철 강제환기식 돈사에서 돈방 자체를 챔버로 가정하는 mega chamber 법을 활용하여 비육돈의 온실가스 배출 특성을 평가하고 최종적으로 배출계수를 산정하였다. 동일한 환경의 돈방 2곳을 선정 후 비육시기 동안 온실가스인 CH₄, N₂O의 농도, 환기량, 돈방 온도를 실시간 모니터링하였다. 모니터링 기간 동안 발생한 CH₄과 N₂O의 평균 농도는 각각 20.7~26.7 ppm, 1.4~1.6 ppm으로 나타났다. 돈방 내부의 평균 온도는 20.0~21.4°C로 측정되었으며, 평균 환기량은 1345.4~1567.3 m³/h로 분석되었다. 일변화 경향 분석 결과, 13~15시 사이에 최고 온도와 최대 환기량 값으로 측정되었으며, 두 환경조건은 유사한 일변화 경향으로 관측되었다. 온실가스는 시간 평균 농도는 CH₄ 18.8~35.4 ppm, N₂O 1.4~1.8 ppm로 분석되었으며, 시간 평균 발생량은 CH₄ 0.20~0.42 g/h/m²/pig, N₂O 0.036~0.051 g/h/m²/pig로 나타났다.

CH₄의 일별 배출량은 약 30일까지 3.6~8.2 g/d/m²/pig로 매일 일정한 배출량을 보였으나, 이후 발생량이 급격히 증가하는 양상을 보였다. N₂O의 일별 배출량은 0.7~1.3 g/d/m²/pig로 시험 기간 동안 안정된 배출을 보였으며, CH₄의 배출량에 비해 상대적으로 미미한 배출량을 보였다. 반복 시험된 두 돈방 간 유의적인 차이가 없음을 확인 후 최종 배출계수를 산정한 결과 각 돈방의 평균값인 CH₄ 6.21 g/d/m²/pig, N₂O 1.02 g/d/m²/pig의 값이 도출되었다. 산정된 온실가스 배출계수를 GWP를 적용하여 CO₂eq으로 환산한 결과 CH₄, N₂O가 각각 173.9 CO₂eq, 270.3 CO₂eq로 나타나 돈사에서 CH₄ 발생은 많지만 N₂O에 비하여 온실가스로서의 기여도는 낮음을 확인하였다.

IPCC 가이드라인에서는 제시된 기본 (default) 배출계수가 아닌 자국의 환경이 반영된 국가 고유 (country specific) 배출계수 적용 시 불확도 저감, 신뢰도 있는 배출량 산정 등의 이

유로 국가 고유 배출계수 적용을 권고하고 있다. 그럼에도 불구하고 국내 농업 축산 분야 국내 고유 배출계수에 대한 연구 및 개발은 활발히 이루어지지 못하고 있다. 따라서 사육시기, 축종 등 다양한 배출계수 연구가 지속적이고 반복적으로 이루어져야 하며, 본 연구에서 수행하지 못한 가축분뇨 성상 분석 등 심화적인 배출계수 연구를 수행하여 배출량 산정에 정확도를 높이는 접근이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 연구비 지원 (과제명: 모돈, 자돈 유래 NH₃ 배출량 평가 및 바이오커튼 효능 평가 프로토콜 개발, PJ01601902)을 받아 수행되었음.

REFERENCES

1. Amon, B., V. Kryvoruchko, T. Amon, and S. Zechmeister-Boltenstern, 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112(2-3): 153-162. doi:10.1016/j.agee.2005.08.030.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE), 1993. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*.
3. Brown, H. A., C. Wagner-Riddle, and G. W. Thurtell, 2000. Nitrous oxide flux from solid dairy manure in storage as affected by water content and redox potential. *Journal of Environmental Quality* 29(2): 630-638. doi:10.2134/jeq2000.00472425002900020034.
4. Cabaraux, J. F., F. X. Philippe, M. Laitat, B. Canart, M. Vandenneede, and B. Nicks, 2009. Gaseous emissions from weaned pigs raised on different floor systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 130(3-4): 86-92. doi:10.1016/j.agee.2008.11.016.
5. Cardador, M. J., C. Reyes-Palomo, C. Diaz-Gaona, L. Arce, and V. Rodriguez-Estévez, 2020. Review of the methodologies for measurement of greenhouse gas emissions in livestock farming: pig farms as a case of study. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 1-19. doi:10.1080/10408347.2020.1855410.
6. Dai, X. R., and V. Blanes-Vidal, 2013. Emissions of ammonia, carbon dioxide, and hydrogen sulfide from swine

- wastewater during and after acidification treatment: effect of pH, mixing and aeration. *Journal of Environmental management* 115: 147-154. doi:10.1016/j.jenvman.2012.11.019.
7. Dong, H., G. Kang, Z. Zhu, X. Tao, Y. Chen, H. Xin, and J. D. Harmon, 2009. Ammonia, methane, and carbon dioxide concentrations and emissions of a hoop grower-finisher swine barn. *Transactions of the ASABE* 52(5): 1741-1747. doi:10.13031/2013.29136.
 8. Dong, H., Z. Zhu, Z. Zhou, H. Xin, and Y. Chen, 2011. Greenhouse gas emissions from swine manure stored at different stack heights. *Animal Feed Science Technology* 166(167): 557-561. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.039.
 9. Food Agriculture Organization (FAO), 2017. World agriculture: towards 2015/2030. An FAO perspective. *FAO Rome* 97.
 10. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, 2014. National greenhouse gas emission and absorption factor development verification first plan 2015-2019 (in Korea).
 11. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture forestry and other land use. Intergovernmental Panel on Climate Change, vol. 4. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Kamiyamaguchi, Hayama, Kanagawa, Japan.
 12. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*, Geneva, Switzerland 151.
 13. Jeong, H. C., E. J. Choi, J. S. Lee, G. Y. Kim, and S. I. Lee, 2017. The analysis of differences by improving GHG emission estimation methodology for agricultural sector in recent 5 years. *Journal of Climate Change Research* 8(4): 347-355 (in Korean). doi:10.15531/KSCCR.2017.8.4.347.
 14. Jo, G. G., T. H. Ha, Y. N. Jang, S. Y. Seo, and M. W. Jung, 2020a. 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). doi:10.15250/joie.2020.19.1.29.
 15. Jo, G. G., T. H. Ha, S. H. Yoon, Y. N. Jang, and M. W. Jung, 2020b. Comparison of regression models for estimating ventilation rate of mechanically ventilated swine farm. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(1): 61-70 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2020.62.1.063.
 16. Jo, G. G., Y. N. Jang, T. H. Ha, S. E. Woo, and M. W. Jung, 2020c. Ammonia emission characteristics during the finishing periods of pigs housed with mechanical ventilation system. *Journal of Agriculture and Life Science* 54(3): 63-71 (in Korean). doi:10.14397/jals.2020.54.3.1
 17. Kam, D. H., K. H. Park, D. Y. Choi, M. S. Jung, B. R. Min, D. W. Lee, and J. K. Kim, 2011. Measurements of greenhouse gas from the manure in the piggery. *Journal of Animal Environmental Science* 17(3): 155-162 (in Korean).
 18. Kebreab, E., K. Clark, C. Wagner-Riddle, and J. France, 2006. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review. *Canadian Journal of Animal Science* 86(2): 135-137. doi:10.4141/a05-010.
 19. Lin, Y. F., and K. C. Chen, 1993. The relationship between denitrifying bacteria and methanogenic bacteria in a mixed culture system of acclimate sludges. *Water Research* 27(12): 1749-1759. doi:10.1016/0043-1354(93)90113-V.
 20. Massé, D. I., L. Masse, S. Claveau, C. Bdnchaar, and O. Thomas, 2008. Methane emissions from manure storages. *Transactions of the ASABE* 51(5): 1775-1781. doi:10.13031/2013.25311.
 21. Monteny, G. J., A. Bannink, and D. Chadwick, 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112: 163-170. doi:10.1016/j.agee.2005.08.015.
 22. Ngwabie, N. M., S. Nimmermark, and G. Gustafsson, 2011. Effects of animal and climate parameters on gas emissions from a barn for fattening pigs. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 27(6): 1027-1038. doi:10.13031/2013.40619.
 23. Oenema, O., N. Wrage, G. L. Velthof, J. W. Van Groenigen, J. Dolfing, and P. J. Kuikman, 2005. Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72(1): 51-65. doi:10.1007/s10705-004-7354-2.
 24. Park, S. M., H. B. Jun, C. O. Choi, and J. S. Lee, 2005. Influence of COD/Nitrate-N ratio on denitrification and methanogenesis in anaerobic sludge. *Korean Society of Environmental Engineers* 27(7): 739-745 (in Korean).
 25. Park, W. K., H. B. Jun, N. B. Park, and S. G. Hong, 2010. Solubilization characteristics of piggery slurry by different storage type and temperature conditions. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 29(4): 348-353 (in Korean).

- doi:10.5338/KJEA.2010.29.4.348.
26. Philippe, F. X., and B. Nicks, 2015. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 199: 10-25. doi:10.1016/j.agee.2014.08.015.
 27. Poth, M., and D. D. Focht, 1985. ^{15}N kinetic analysis of N_2O production by *Nitrosomonas europaea*: An examination of nitrifier denitrification. *Applied and Environmental Microbiology* 49: 1134-1141. doi:10.1128/aem.49.5.1134-1141.1985.
 28. Shin S. R., S. W. Im, A. Mostafa, M. K. Lee, Y. M. Yun, S. E. Oh, and D. H. Kim, 2019. Effects of pig slurry acidification on methane emissions during storage and subsequent biogas production. *Water Research* 152: 234-240. doi:10.1016/j.watres.2019.01.005.
 29. Thompson, A. G., C. Wagner-Riddle, and R. Fleming, 2003. Emissions of N_2O and CH_4 during the composting of liquid swine manure. *Environmental Monitoring and Assessment* 91(1): 87-104. doi:10.1023/B:EMAS.0000009231.04123.2d.
 30. Wang, K., D. Huang, H. Ying, and H. Luo, 2014. Effects of acidification during storage on emissions of methane, ammonia, and hydrogen sulfide from digested pig slurry. *Biosystems Engineering* 122: 23-30. doi:10.1016/j.biosystemseng.2014.03.002.
 31. Ye, Z., G. Zhang, L. H. Seo, P. Kai, C. K. Saha, C. Wang, and B. Li, 2009. Airflow characteristics at the surface of manure in a storage pit affected by ventilation rate, floor slat opening, and headspace height. *Biosystems Engineering* 104(1): 97-105. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.05.005.
 32. Zhuang, M., N. Shan, Y. Wang, D. Caro, R. M. Fleming, and L. Wang, 2020. Different characteristics of greenhouse gases and ammonia emissions from conventional stored dairy cattle and swine manure in China. *Science of the Total Environment* 722: 137693. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137693.
 33. Zong, C., H. Li, and G. Zhang, 2015. Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 208: 94-105. doi:10.1016/j.agee.2015.04.031.