

봄과 여름철 강제환기식 모돈사 내 온실가스 배출 특성 연구

박소연* · 장유나** · 조광곤*** · 정민웅**** · 서시영***** · 황옥화***** · 박준수*****†

*국립축산과학원 축산환경과 전문연구원, **전북지방환경청 환경관리과 연구사,
금강유역환경청 측정분석과 연구사, *국립축산과학원 축산환경과 연구관, *****국립축산과학원 축산환경과 연구사

A study on greenhouse gas emission characteristics of sow house with forced ventilation system during spring and summer

Park, Soyeon* · Jang, Yu-Na** · Jo, Gwanggon*** · Jung, Min-Woong**** · Seo, Siyoung***** · Hwang, Okhwa***** and Park, Junsu*****†

*Research associate fellow, Department of Animal Biotechnology and Environment, National Institute of Animal Science (NIAS), Jeonju, Korea

**Researcher, Environment Management Division, Jeonbuk Regional Environment Office, Jeonju, Korea

***Researcher, Monitoring and Analysis Division, Geum River Basin Environment Office, Daejeon, Korea

****Research officer, Department of Animal Biotechnology and Environment,

National Institute of Animal Science (NIAS), Jeonju, Korea

*****Researcher, Department of Animal Biotechnology and Environment, National Institute of Animal Science (NIAS), Jeonju, Korea

ABSTRACT

This study was conducted in three similar-structured pig rooms for approximately 160 days from March 25 to August 31, 2021 to investigate greenhouse gas emissions and characteristics emitted from sow housing with forced ventilation systems. Greenhouse gas emissions and coefficients were calculated by real-time measurement of greenhouse gas (Nitrous Oxide, Methane) concentrations, ventilation rate, and inside temperature and humidity in a pig house based on the mega chamber method, which assumes a closed pig room in the form of a chamber. The average concentration of Nitrous Oxide (N₂O) in each room was in the range of 0.5 to 0.6 ppm, and Methane (CH₄) concentration was in the range of 28.9 to 33.5 ppm. The average N₂O emissions from Rooms 1 to 3 were 4.7 ± 1.4, 4.5 ± 1.3, and 5.2 ± 1.6 mg/day · m² · pig. In the case of CH₄, average emissions were 86.0 ± 15.6, 100.2 ± 31.2, and 103.3 ± 26.7 mg/day · m² · pig. Finally, greenhouse gas emissions from sows calculated in this study were 1.87 ± 0.6 g/year · m² · pig (N₂O) and 35.4 ± 8.8 g/year · m² · pig (CH₄). Greenhouse gas emission coefficients were calculated as carbon dioxide equivalent (CO₂-eq) by applying Global Warming Potential (GWP) and were 1.38 g CO₂-eq and 2.64 g CO₂-eq for N₂O and CH₄, respectively. This suggests that the contribution of CH₄ is higher than that of N₂O emitted by sows. The results of this study present useful data for domestic emission coefficient research.

Key words: Greenhouse Gas Emission, Nitrous Oxide, Methane, Sow, Mechanical Ventilation

1. 서론

온실가스는 태양으로부터 지구로 유입되는 빛 에너지를 흡수 및 재방출을 통해 온실효과를 유발하는 가스 물질을 말한다. 온실가스는 대표적으로 이산화탄소(Carbon

dioxide; CO₂), 메탄(Methane; CH₄), 아산화질소(Nitrous oxide; N₂O), 과불화탄소(Perfluorocarbons; PFCs), 수소불화탄소(Hydrofluorocarbons; HFCs), 육불화황(Sulfur hexafluoride; SF₆), 삼불화질소(Nitrogen trifluoride; NF₃)로 7개의 물질로 구분되어 있으며, 이러한 온실가스는 주

†Corresponding author : karmon2@korea.kr (1500, Kongjipatjwi-ro, Iseo-myeon, Wanju_Gun, Jeollabuk-do, Korea. Tel. +82-63-238-7403)

ORCID 박소연 0000-0002-1313-8418
장유나 0000-0003-1727-4959
조광곤 0000-0003-0181-6362
정민웅 0000-0002-8923-0034

서시영 0000-0003-4692-7541
황옥화 0000-0003-0681-4577
박준수 0000-0001-6283-6047

로 빙하 감소, 사막화, 해수면 상승이 발생하며 기상이변, 생태계 변화 등을 야기하는 것으로 알려져 있다(Titus, 1986; Severinsky, 2020; Dowling et al., 2021).

JRC science for policy report 2021에 따르면 전세계적으로 발생된 온실가스 배출량은 2020년 기준 51,199.9 Mt으로 보고되었다. 이때, 온실가스의 주 배출원은 전력 산업 부문(14,000 Mt, 27.3%)이며, 건축업(3,874.1 Mt, 7.6%), 운송(8,270.4 Mt, 16.2%), 산업연소(8,057.2 Mt, 15.7%), 기타 부문(산업공정, 농업, 폐기물)(16,997.8 Mt, 33.2%)에서도 배출되는 것으로 알려져 있다(Crippa et al., 2021). 특히, Herrero et al.(2016)에 따르면, 축산 부문의 경우, 2005년 기준 7,500 Mt의 온실가스를 배출한 것으로 추정되며, 이중, 장내 발효로 발생하는 CH₄는 1,600~2,700 Mt, 사료 생산 관련 배출(N₂O)은 1,300~2,000 Mt로 보고되었다. 또한, 전체 온실가스 중 약 14.5%의 축사에서 발생하고(Cardador et al., 2020), 축산물 생산에서도 발생하는 것으로 보고되었다(Berlin, 2002; Foster et al., 2006). 국외 여러 국가의 온실가스 배출량은 2018년 기준 중국 13739.8 Mt, 미국 6,297.6 Mt, 유럽 3924.9 Mt, 인도 3619.8 Mt, 러시아 2313.7 Mt, 일본 1270.2 Mt이 배출된 것으로 추정되었다(Crippa et al., 2021). 한국의 경우, 국가 온실가스 통계자료에 의하면 2015년부터 최근 5년간 693.6 Mt에서 701.4 Mt로 약 8.8 Mt (1.3%) 상승한 것으로 보고되었다(GIR, 2020). 하지만 2018년 727 Mt에 비해 2019년은 701.4 Mt로 약 3.5% 감소한 것으로 나타났다. 2019년 기준 주요 배출원으로는 에너지 611.5 Mt (87.2%), 산업공정 52.0 Mt (7.4%), 농업 21.0 Mt (3.0%), 폐기물 16.9 Mt (2.4%) 순으로 나타났다.

온실가스의 중요성이 강조됨에 따라 국가적 측면에서 2030 국가온실가스 감축목표(NDC: Nationally Determined Contributions)와 2050 탄소중립시나리오 등의 정책을 수립하고 있다. 탄소중립기본법 제8조 제1항에 따르면, 2030년까지 온실가스 배출량은 2018년 대비 35% 이상 감축, 2050년까지 온실가스 순배출량을 '0'으로 설정하여 온실가스 배출량을 저감하는 방향으로 가고있다. 이에 따라 온실가스 저감을 위한 정확한 배출량 파악이 중요하지만, 현재 축산업 유래 온실가스 배출량 연구는 매우 부족한 실정이다.

국내 축산업의 경우 소, 돼지, 닭 등 축종별로 환기 방법에 따른 축사구조, 사육밀도, 사료성분 및 사육기간 등이 다르며, 같은 축종이라 할지라도 사양단계를 구분하여 사육한다. 하지만 현행 돈사 내 온실가스 배출계수는 공인된 배출계수 산정 프로토콜이 전무하고, IPCC 보고서의 온실가스 배출계수를 그대로 인용하고 있다는 한계

점이 존재한다. IPCC가 제공하는 배출계수 데이터베이스(emission factor database, EFDB)에 따르면 아시아 지역의 메탄 배출계수는 1 kg/pig/year로 보고되어 있지만(IPCC, 2006), 이는 '돼지'의 전체 분류에 해당하며 국내의 환경을 반영하고 있지 않기 때문에 축종 및 사양단계에 따른 국내 고유의 배출계수 산정이 필요할 것으로 보인다. 또한 온도조건에 영향을 받는 온실가스와 같은 경우, 측정 시 기상조건(기온 및 온습도) 등 계절에 따른 영향을 고려한 장기간 모니터링이 필요하다(Park et al., 2022). 따라서 본 연구는 돼지 사양단계 중 모돈에서 발생하는 온실가스의 농도, 환기량, 온도 등을 실시간으로 측정하여 온실가스(CH₄, N₂O) 배출량 및 배출계수를 산정해 국내 고유배출계수 연구에 기여하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 돈사 구조 및 사육환경

본 연구는 충북 단양시에 위치한 모돈사 내부에서 2021년 3월 25일부터 8월 31일(약 160일) 기간 동안 수행되었으며, Fig. 1은 실험 돈사의 단면도 및 평면도를 나타낸다. 모돈사 내부는 임신한 돼지 사육이 가능한 스톨(stall)이 구역당(1줄) 26개로 총 5개의 사육구역과 후보모돈을 사육하는 Pen으로 구성되어 있다(Fig. 1b). 본 실험의 정확도를 향상시키기 위해, 서로 비슷한 환경의 모돈사 3곳(Room 1~3)을 선정하여 동일한 기간 동안 측정을 진행하였다. Room 1~3은 각각 154, 154, 156 두의 모돈을 사육했으며, 분만이 임박한 돼지는 1개의 사육구역씩 분만사로 이동하여 분만 및 포유를 진행한다. 분만이 완료되면 다시 모돈사로 돌아오며, 시험기간 중 돈사 내 사육두수는 사육면적 기준 90% 이상, 사육밀도는 2.1 m²/pig(임신돈 기준 1.4 m²/pig, 축산법 시행령 별표 1)으로 유지되었다(VERA, 2018). 돈방 내 바닥 재질은 콘크리트 바닥과 슬랫(slatted floor)이 1:1 비율로 구성되었으며 돼지의 분뇨는 슬랫 하부의 피트에 저장되는 구조이다(Fig. 1a, 1b). 슬러리 피트의 저장되는 총량은 약 8 ton이며, 저장된 분뇨는 매주 화요일 정기적으로 배출하였다. 또한, 돈방 내 바닥부터 천장까지의 거리는 약 3m 정도이다. 돈사의 환기는 돈사 외벽에서 들어온 공기가 중앙 천장을 통해 유입된 뒤, 돈방 내부에 위치한 4개의 배기구(fan)를 통해 배출된다(Fig. 1a, 1b). 측정 기간 모돈에게 공급한 사료의 성분은 조단백질(Crude protein, 13.5 % 이하), 조지방(Crude fat, 3% 이상), 칼슘(Calcium, 0.65% 이

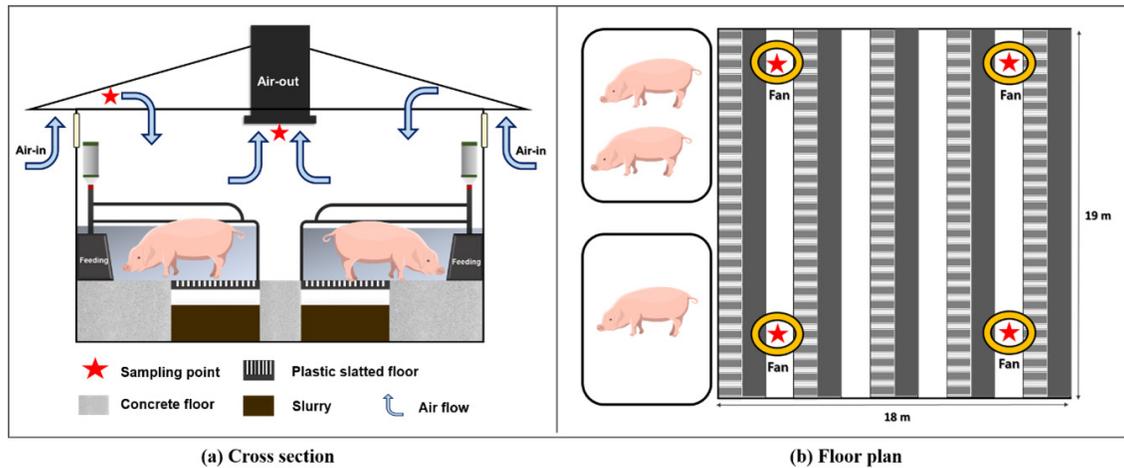


Fig. 1. Schematic diagram of gestation swine room

상), 인(Phosphorus, 1.5%), 조섬유(Crude fiber, 8% 이하), 조회분(Crude ash, 8% 이하), 라이신(Lysine, 0.6% 이상)으로 구성되어 있다.

2.2. 온실가스(CH₄, N₂O) 농도, 환기량 및 온·습도

본 연구에서 CH₄, N₂O는 실시간 모니터링이 가능한 광음향분광법의 측정기(LumaSense Technologies INNOVA 1512, Ballerup, Denmark)를 사용하여 측정을 진행하였다. 이때, 여러 sample point를 동시에 측정하기 위해 멀티샘플러(LumaSense Technologies INNOVA 1409 (24 port), Ballerup, Denmark)를 함께 사용하였다. 본 연구는 돈방 하나를 거대한 챔버로 가정하여 온실가스 배출량을 측정하는 mega chamber법을 기반으로 수행되었으므로, 외부 공기가 유입되는 입기구 중 한곳과, 유일한 배출구인 배기팬을 각 돈방의 sample point로 설정하였다. 측정 주기는 현장 상황 및 기기 과부하 문제 등을 고려하여 매 2시간마다 6회 측정하였다. 수집된 데이터 중 중 최소 흡인 횟수를 고려하여(Jo et al., 2020a) 4~6번째 값의 평균 농도를 2시간 대표값으로 산출하였다. 또한, 측정 장비의 정확도를 검증하기 위해 현장 설치 전 고순도 N₂ 가스(Rigas 99.999%, Daejeon, Korea)와 CH₄ (500 ppm, Rigas 99.999%, Daejeon, Korea), N₂O (1 ppm, Rigas 99.999%, Daejeon, Korea)의 표준가스를 이용하여 기기 검정을 진행하였다. 측정 결과, 평균 오차율이 약 10%, R² 값 0.9999로 측정값과 표준가스와의 큰 오차를 보이지 않았다.

돈사 내 환기량은 소형 환기량 측정장치를 제작하여 배기팬(Vostermans ventilation BV Multifan 4E50 (Ø630), Venlo,

Netherlands)에 부착하고 배기팬 가동률에 따른 환기량을 측정하였다(ASHRAE, 1993). 돈사의 최소 환기팬 가동률은 30% 이하로 가동되지 않았으므로 30%, 50%, 70%, 100%에 해당하는 가동률에서 환기량을 실측하였다(Jo et al., 2020a). 측정 기간 환기팬의 가동률은 1% 단위로 조절되었고, 실측한 가동률을 벗어난 구간에서 환기량 추정을 위해 logistic curve 모델을 이용하였다(Jo et al. 2020b). 측정된 Room 1~3 평균 환기량은 Room 1: 11,334.5 ± 3,747.5 m³/hour, Room 2: 11,473.1 ± 3,604.4 m³/hour, Room 3: 12,490.8 ± 3,748.4 m³/hour로 나타났다. 돈방 내부온도, 환기팬 가동률은 분당 1회 측정된 데이터의 1시간 평균값을 사용하였다.

2.3. 온실가스(CH₄, N₂O) 배출계수 산정

본 연구에서는 밀폐식 돈사의 돈방 하나를 챔버 형태로 가정한 mega chamber법을 사용하여 배출계수를 산정하였다(Park et al., 2021; Thompson et al., 2003; Brown et al., 2000). 최종적으로 온실가스 배출량 산정 공식은 아래와 같다(식 1, 2, 3).

$$E_{gas} (mg \cdot hour^{-1} \cdot m^{-2} \cdot pig^{-1}) = C_{Net} \times \frac{Flow\ rate}{Area \times pig} \times \rho_{gas} \tag{1}$$

$$\rho_{gas} (g \cdot L^{-1}) = \frac{P \times M}{R \times T} \tag{2}$$

$$E_{GHG} (mg \cdot day^{-1} \cdot m^{-2} \cdot pig^{-1}) = \frac{1}{day} \sum \{E_{GHG}(start\ date) + \dots + E_{GHG}(end\ date)\} \tag{3}$$

E_{gas} : 단위면적당 돼지 1마리가 1시간당 배출하는 온실
가스량 ($mg \cdot hour^{-1} \cdot m^{-2} \cdot pig^{-1}$)

C_{Net} : 온실가스(CH₄, N₂O) 순농도(ppm)

Flow rate: 1시간 평균 환기량($m^3 \cdot hour^{-1}$)

p_{ig} : 돼지 사육 두수

ρ_{gas} : 가스 밀도

P: 표준압력(101,325 kg/m²)

M: 분자량(kg/kmol)

R: 유니버설가스상수($8.314 \times 10^3 Pa \cdot m^3/kmol/K$)

T: 온도(K)

day: 총 측정 기간 중 일수

온실가스(CH₄, N₂O)는 돈방의 순수 발생농도인 C_{Net} ($C_{Out}-C_{In}$)를 계산하였고, 이후 식 1, 2를 통해 단위면적당, 돼지 1마리가 1시간당 온실가스를 배출하는 양인 E_{gas} 를 산출하였다. 이를 다시 식 3을 이용해 일단위 배출량을 계산하였으며, 이때 이상치 제거기준($Outlier_{upper} > upper \text{ quartile } (75^{th}; 3Q) + (3 \times IQR)$, $Outlier_{lower} > lower \text{ quartile } (25^{th}; 1Q) - (3 \times IQR)$; IQR: Inter quartile range)에 따라 데이터를 제거하여 불확도를 최소화하였다. 일단위 배출량을 모두 합산한 후, 측정 일수로 나누어 최종적인 모돈사 내 단위면적당 돼지 1마리가 발생하는 온실가스 배출계수 E_{GHG} ($g \cdot year^{-1} \cdot m^{-2} \cdot pig^{-1}$)를 산정하였다.

$$CO_{2-eq} = E_{GHG} \times GWP_{gas} \tag{4}$$

또한, 산정된 배출계수에 2021 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 6차 보고서에서 제시하고 있는 Global Warming Potentials (GWP; CH₄: 27.2, N₂O: 273)로 환산하여, 온실가스를 CO₂ 1kg (CO₂-eq, Carbon dioxide equivalent)비율로 상대적인 영향을 비교하였다(식 4). 추가적으로 측정된 값의 통계 분석을 수행하기 위해 통계 소프트웨어 프로그램인 Jamovi (Version 2.2.3)를 이용하였다. 측정 변수의 상관성 분석을 위해 먼저, 분석된 데이터의 정규성 검정(Shapiro-Wilk normality test)을 수행하여 정규 및 비정규 분포를 구분하였다($p > 0.05$; 정규분포 가정). 분석결과, 모든 측정 항목이 비정규 분포로 나타나 ‘Spearman’s correlation coefficient’를 이용하여 상관분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온실가스(CH₄, N₂O) 실시간 모니터링 결과

측정기간 동안 측정된 각 돈방에서의 일별 N₂O와 CH₄ 농도, 돈방의 환기량, 내부온도를 시계열 그래프로 나타냈다(Fig. 2). N₂O의 농도 범위는 Room 1: 0.2 ~ 1.4 ppm, Room 2: 0.3 ~ 1.6 ppm, Room 3: 0.2 ~ 1.5 ppm이며, N₂O 평균 농도는 각각 0.6 ± 0.3 , 0.5 ± 0.2 , 0.6 ± 0.3

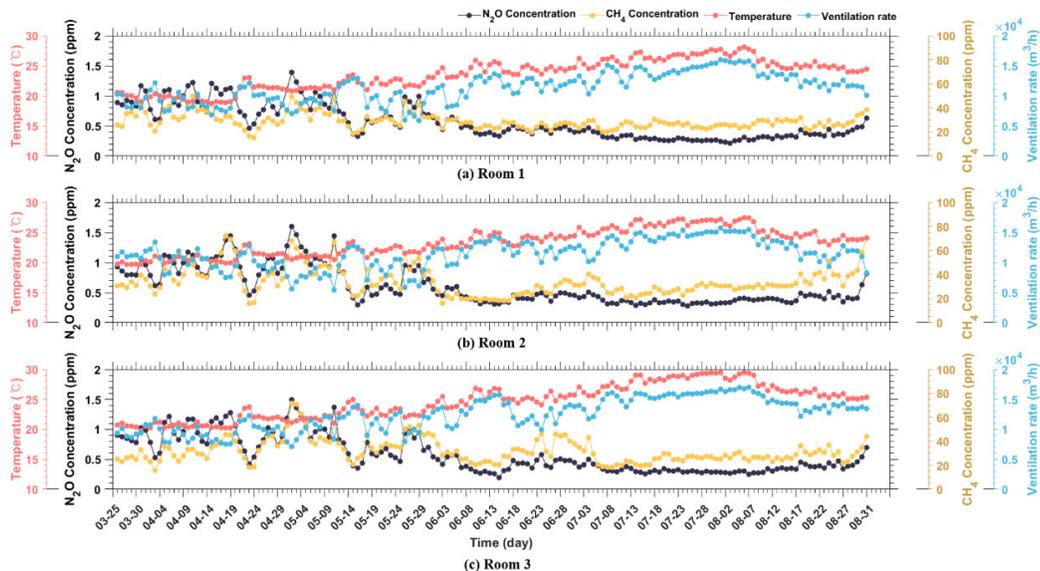


Fig. 2. Daily monitoring result of Green House Gas (N₂O, CH₄) concentration, indoor temperature, and ventilation in room 1 ~ 3

ppm으로 측정되었다. CH₄의 농도 범위는 Room 1: 15.2 ~ 49.7 ppm, Room 2: 15.8 ~ 72.1 ppm, Room 3: 15.7 ~ 71.7 ppm이며 CH₄ 평균 농도는 각각 28.9 ± 6.3 ppm, 33.5 ± 12.1 ppm, 31.9 ± 10.0 ppm이었다. 선행연구에 따르면, 모돈사에서 발생한 N₂O와 CH₄ 농도 범위는 각각 0.3 ~ 0.5 ppm, 12.0 ~ 28.5 ppm으로 본 연구에 비해 낮은 농도 수준을 보였다(Stinn et al., 2014; Philippe et al., 2016). 특히 Room1의 CH₄ 농도가 다른 Room에 비해 낮게 나타났는데, 이는 돈사의 주 출입 통로가 Room 1과 연결되어 작업자의 출입 시 외부에서 깨끗한 공기가 유입된 것으로 판단된다.

측정기간 내 Room 1,2,3의 평균 내부 온도는 각각 23.5, 23.3, 24.6°C이며(Fig. 2), 내부 습도는 71.6, 70.4, 71.3%로 돈방의 실내 환경이 비슷하게 유지되었다. 측정기간 Room 1 ~ 3의 환기량은 각각 5,869.1 ~ 16,007.7 m³/hour, 5,419.9 ~ 15,729.0 m³/hour, 7,108.4 ~ 17,030.4 m³/hour의 범위를 보였다. Room 1 ~ 3에서 평균 환기량은 각각 11,334.5 ± 2,440.7 m³/hour, 11,473.1 ± 2,392.0, 12,490.8 ± 2,658.4 m³/hour로, 두당 환기량으로 환산할 경우 각각 73.60, 75.50, 80.06 m³/hour · pig로 나타났다. 미국 MWPS에서 권장하는 모돈 권장 환기량(봄: 68.0 m³/hour · pig, 여름: 254.9 m³/hour · pig)보다 낮게 나타났다(MWPS, 1990).

3.2. 일변화 경향성

봄 ~ 여름철 기간 Room 1 ~ 3의 온실가스(N₂O, CH₄) 농도, 내부온도, 환기량의 일변화 경향을 Fig. 3에 나타냈다. 측정기간 돈사 내 N₂O, CH₄ 농도 및 환기량, 내부 온도에 대한 뚜렷한 일변화 경향성이 나타났다. 모든 돈방 내부온도는 외부온도의 경향성과 유사하게 일출 이후 기온이 상승함에 따라 내부온도가 상승하여 14시에 최고 온도(Room 1 ~ 3 25.5, 25.3, 26.8°C)를 보였다(Fig. 3c). 돈방 내부온도의 일교차는 약 3°C로 온도편차가 크지 않았다. 환기량의 경우 내부온도의 영향을 받기 때문에 일변화 경향성이 유사하게 나타났다(Fig. 3d). 특히, 온도가 가장 높은 14시의 경우 최대 14916.3 m³/hour, 14836.4 m³/hour, 15636.2 m³/hour로 측정되었다. 반면, N₂O와 CH₄는 다른 경향성을 보였다(Fig. 3a, 3b). 환기량이 상승할 때 N₂O와 CH₄ 농도는 낮아지는 것으로 나타났다(Fig. 3a, 3b, 3d). N₂O의 경우 각각 0.9 ppm, 0.7 ppm, 0.8 ppm로 8시에 가장 높은 농도로 나타났으며, 오후 시간대 농도가 낮아져 약 0.4 ppm로 16시에 가장 낮은 농도를 보였다. CH₄의 경우 39.6 ppm, 45.1 ppm, 43.4 ppm로 4시에 가장 높은 농도를 보이며, 약 20 ppm으로 14시에 가장 낮은 농도로 나타났다. 이는 돈사 내부 배기팬의 가동률이 내부

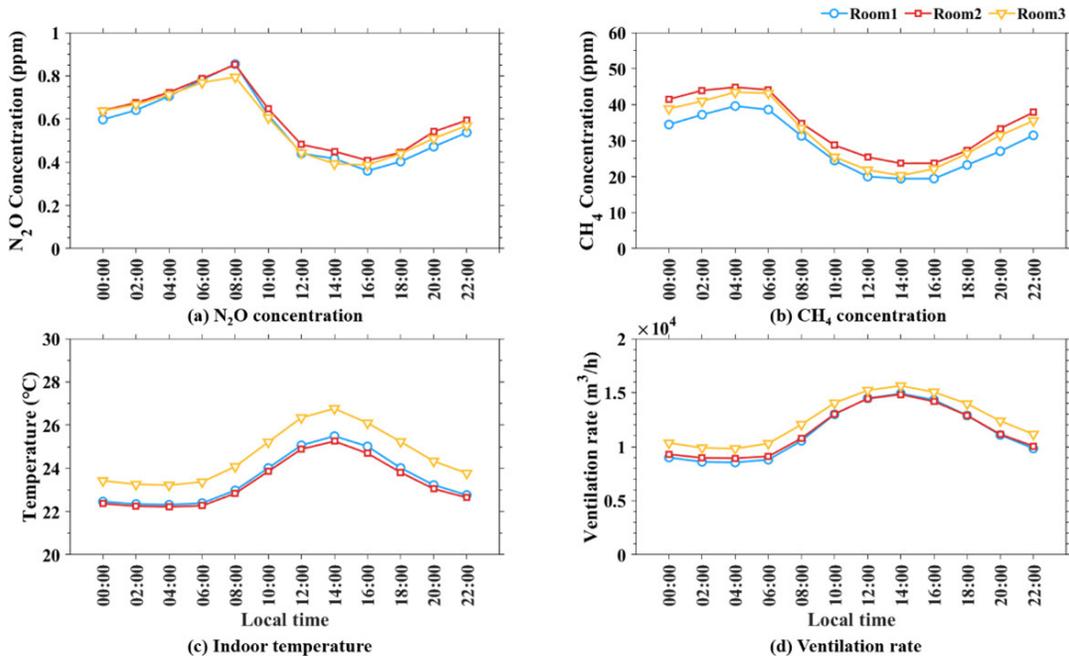


Fig. 3. Diurnal graph of greenhouse gas concentration, ventilation rate and temperature

온도의 영향을 받아 운용되기 때문에, 내부온도 상승시 환기량이 증가하여 내부에 축적된 온실가스가 외부로 배출되면서 농도가 감소하는 것으로 판단된다(Sun et al., 2008; Jacobson et al., 2005).

3.3. 배출계수 산정

모든 가축분뇨 유래 온실가스(N_2O , CH_4) 배출량을 평가하기 위해 돈사 내 온실가스(N_2O , CH_4) 농도와 환기량, 온도 등을 이용하여 Room 1~3의 온실가스 배출량을 산정하였다(식 1~3). Room 1~3의 N_2O 배출량 범위는 각각 2.7~8.1, 2.2~8.0, 2.5~10.1 $mg/day \cdot m^2 \cdot pig$ 범위를 보였으며, 평균 배출량은 4.7 ± 1.4 , 4.5 ± 1.3 , 5.2 ± 1.6

$mg/day \cdot m^2 \cdot pig$ 로 지속적으로 일정한 농도를 배출하는 것으로 측정되었다. 또한 각 돈방에서 큰 차이를 보이지 않았다. N_2O 는 저장된 분뇨에서 질산화(nitrification)와 탈질화(denitrification) 과정 중 중간 생성물로 발생되며 (Poeth and Focht, 1985; Kebreab et al., 2006), 혐기 및 호기 조건이 혼합된 상태에서 생성된다(Monteny et al., 2006; Cabaraux et al., 2009). 또한, 저장된 슬러리에 공기를 주입할 때, 안정된 상태보다 N_2O 가 더 많이 발생하는 것으로 나타났다(Zhang et al., 2012). 하지만 돈사 내부 슬러리 피트는 이와 같은 조건이 드물게 발생한다고 보고되어 있으며(Philippe and Nicks 2015), 본 연구에서 피트 내 슬러리는 거의 혐기성 상태로 유지되었기 때문에 N_2O 의 배출량이 아주 낮은 것으로 판단된다.

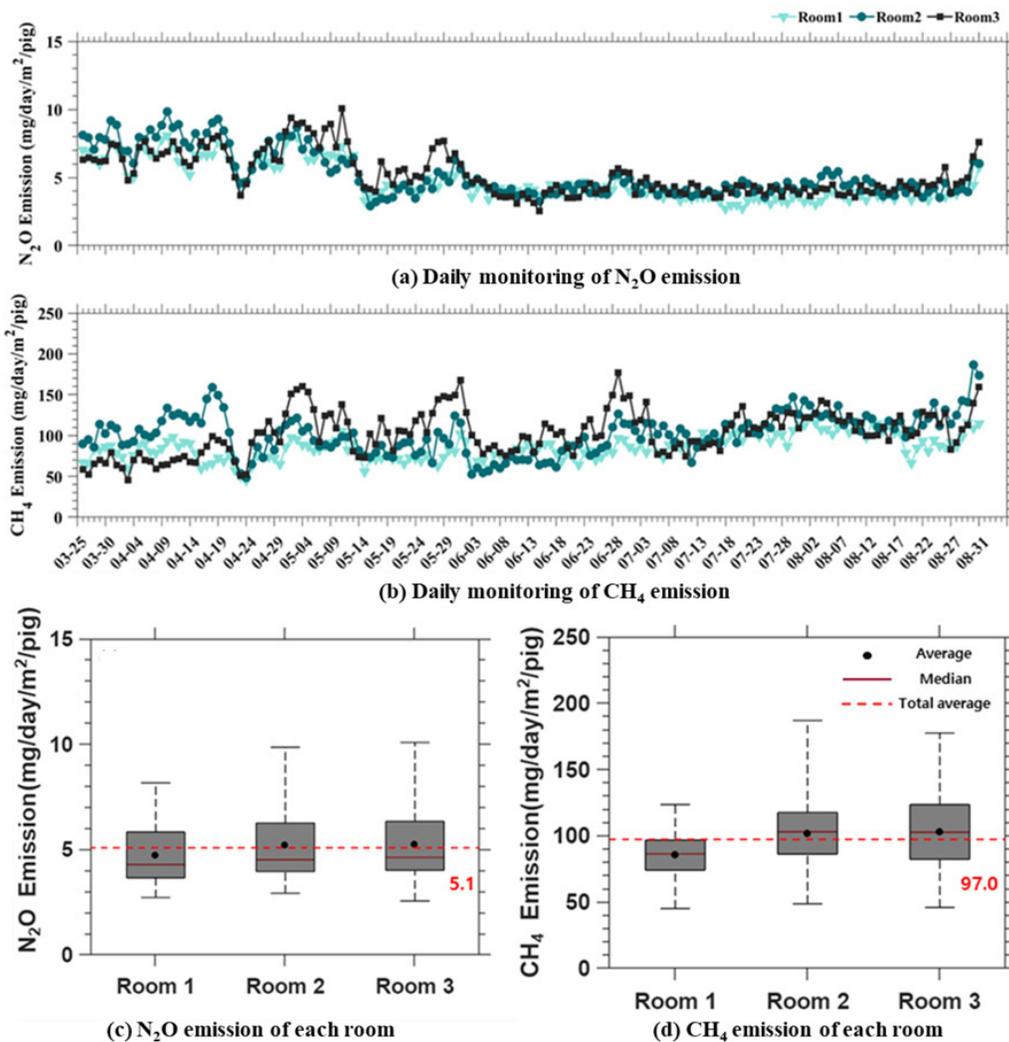


Fig. 4. Daily monitoring result of emission rate for room 1~3

CH₄의 경우 배출량 범위는 각각 44.9 ~ 123.3, 51.0 ~ 231.4, 45.6 ~ 177.2 mg/day · m² · pig 범위를 보였으며, 평균 배출량은 86.0 ± 15.6, 100.2 ± 31.2, 103.3 ± 26.7 mg/day · m² · pig로 측정되었다. 선행연구에 따르면 식이 섬유(Dietary fiber)의 함량과 혐기성 상태, 높은 온도일 때, 메탄 발생량을 촉진시키는 것으로 알려져 있다(Amon et al., 2006; Noblet and Le Goff, 2001; Sommer and Møller, 2000). 또한, 돈사내 슬러리 피트에 분뇨가 지속적으로 저장될수록 혐기성 환경이 만들어져 CH₄의 발생을 증가시키며, 피트의 빈공간이 적을수록 CH₄가 증가하는 것으로 알려져 있다(Ye et al., 2009). 반면, 측정 돈사

의 경우 측정 기간 CH₄의 농도가 일정한 수준으로 나타났다. 이는 높은 온도와 장기간 저장으로 인한 혐기성 환경이 지속적인 CH₄ 배출이 발생하지만, 내부의 환기량이 증가하게 되면서 외부로 배출되기 때문에, 비슷한 농도 수준을 유지하였다. 또한, 측정 돈사의 경우, 주기적으로 매주 가축분뇨를 제거하여 슬러리 수위를 약 80% 수준으로 유지하기 때문에, 일정한 CH₄ 배출량 수준을 보인 것으로 판단된다. 본 연구와 사육기간이 다르지만, Zong et al., 2015에 따르면 측정된 비육돈사 내부 CH₄ 배출량은 여름철 1.2 ~ 1.6 g/day · pig, 겨울철 4.5 ~ 4.8 g/day · pig로 본 연구에 비해 높은 배출량을 보인 것으로 나타났다.

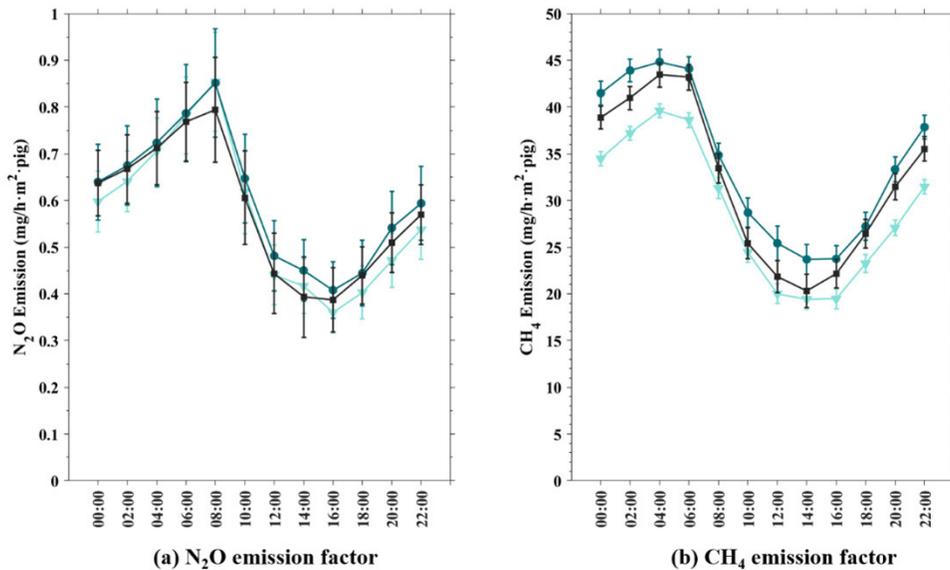


Fig. 5. N₂O, CH₄ emission factor in each room during the measurement period

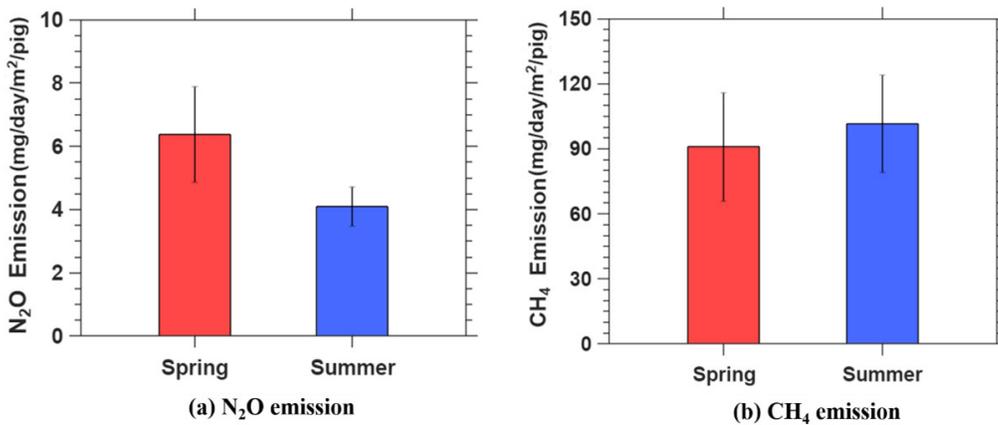


Fig. 6. Seasonal differences between N₂O and CH₄ emission during the measurement period

Table. 1. Results of correlation analysis between N₂O, CH₄ concentration, emission, ventilation, and inside temperature of the pig rooms

	N ₂ O Conc.	CH ₄ Conc.	N ₂ O Emission	CH ₄ Emission	Ventilation	Temperature
N ₂ O conc.	—	0.66***	0.86***	-0.16***	-0.88***	-0.89***
CH ₄ Conc.		—	0.60***	0.50***	-0.60***	-0.49***
N ₂ O Emission			—	0.11*	-0.61***	-0.70***
CH ₄ Emission				—	0.31***	0.34***
Ventilation					—	0.89***
Temperature						—

(* P < 0.1, *** P < 0.001)

각 돈방에서 계절별 차이를 분석하기 위해 Fig. 5를 도시하였다. 앞선 결과와 같이 돈방 내부의 온도 상승은 환기량에 영향을 주고, 이는 온실가스 농도 저감에도 영향을 미친다(Saha et al., 2010). 또한, 겨울철 높은 식이섬유 함량의 사료를 제공하기 때문에, 겨울철 CH₄ 농도가 높은 것으로 알려져 있다(Zong et al., 2015). 본 연구의 봄철과 여름철의 N₂O의 농도는 각각 평균 0.9 ± 0.2 ppm, 0.4 ± 0.1 ppm으로 봄철에 약 2배가까이 높은 농도를 보였다. 또한, N₂O 배출량도 6.4 ± 1.3 mg/day · m² · pig, 4.1 ± 0.5 mg/day · m² · pig로 봄철이 더 많은 배출을 하는 것으로 나타났다. CH₄의 경우, 봄철과 여름철의 평균 농도는 36.5 ± 9.5 ppm, 28.0 ± 5.0 ppm으로 측정되었으나, 배출량의 경우 90.9 ± 15.5 mg/day · m² · pig, 101.6 ± 17.4 mg/day · m² · pig로 여름철에 약 12% 더 높은 것으로 분석되었다.

최종적으로 모든 돈방의 온실가스 배출계수를 평균을 내어 모돈사 유래 온실가스 배출계수를 산정하였다. 최종 온실가스 배출계수는 N₂O 1.87 ± 0.6 g/year · m² · pig, CH₄ 35.4 ± 8.8 g/year · m² · pig로 나타났다. 해당 온실가스 배출계수를 GWP를 적용해 CO_{2-eq} (Carbon dioxide equivalent)로 산출하여 N₂O, CH₄를 비교하였다. CO_{2-eq} 결과 값은 N₂O, CH₄ 각각 1.38 gCO_{2-eq}, 2.64 gCO_{2-eq}로 나타났다. CO_{2-eq} 결과값은 약 1.9배 높게 나타났으며, 이는 돈사에서 발생하는 온실가스 중 N₂O보다 CH₄의 기여도가 높은 것을 시사한다. 그러나 온실가스는 온도조건에 영향을 받을 수 있으므로, 본 연구에 포함되지 않은 가을과 겨울철 기상조건(기온 및 온습도)에 따른 배출량 평가가 필요할 것으로 사료된다.

3.4. 상관분석

측정된 N₂O 농도, CH₄ 농도, N₂O 배출량, CH₄ 배출량, 환기량, 내부 온도 데이터 간 상관분석을 수행하여 표 1에

나타냈다. N₂O와 CH₄의 농도는 내부온도(각각 r = -0.89, r = -0.49)와 환기량(r = -0.88, r = -0.60)이 증가할수록 농도가 낮아지는 음의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 돈방의 환기량은 내부온도를 일정하게 유지하기 위해 온도변화에 따라 배기팬의 가동률을 설정한다. 이에 따라 내부온도가 상승하면 환기량이 증가해 내부의 공기가 밖으로 배출된다. 최종적으로 배출되는 공기가 많아질수록 온실가스의 농도가 감소하는 것으로 판단된다. 또한, 온실가스 배출량은 농도를 기반으로 산정되기 때문에 비슷한 결과를 보였다. 하지만 CH₄ 배출량의 경우, 환기량과 내부온도와의 양의 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구는 강제환기식 모돈사 유래 온실가스 배출량 및 특성을 평가하고자 2021년 3월 25일부터 8월 31일까지 약 160일의 기간 동안 유사한 구조의 돈방 3곳에서 수행되었다. 밀폐식 돈사의 돈방 하나를 챔버 형태로 가정된 mega chamber법을 기반으로 돈사 내 온실가스(N₂O, CH₄) 농도 및 환기량, 온·습도를 실시간 모니터링하여 온실가스 배출량과 배출계수를 산정하였다. 측정결과 각 돈방의 N₂O 평균 농도는 0.5 ~ 0.6 ppm 범위로, CH₄의 평균 농도는 28.9 ~ 33.5 ppm범위로 나타났다. 또한 측정기간 돈사 내 N₂O, CH₄ 농도 및 환기량, 내부 온도에 대한 뚜렷한 일변화 경향성을 확인할 수 있었다. 환기량의 경우 내부온도의 영향을 받기 때문에 일출, 일몰로 인한 온도의 일변화 경향성과 비슷했으나, N₂O와 CH₄는 환기량이 상승할 때 오히려 농도가 낮아졌다. 이는 내부온도 상승시 환기량이 증가하여 내부에 축적된 온실가스가 외부로 배출되면서 농도가 감소한 것으로 판단된다. Room 1 ~ 3의 평균 N₂O 배출량은 4.7 ± 1.4, 4.5 ± 1.3, 5.2 ± 1.6

mg/day · m² · pig로 지속적으로 일정한 농도를 배출하는 것으로 측정되었다. CH₄의 경우 각 돈방의 평균 배출량은 86.0 ± 15.6, 100.2 ± 31.2, 103.3 ± 26.7 mg/day · m² · pig로 나타났다. 최종적으로 본 연구에서 산정된 모돈사 유래 온실가스 배출계수는 N₂O 1.87 ± 0.6 g/year · m²/pig, CH₄ 35.4 ± 8.8 g/year · m² · pig 로 나타났으며, 해당 온실가스 배출계수를 GWP를 적용해 CO_{2-eq}로 산출한 결과 N₂O, CH₄ 각각 1.38 gCO_{2-eq}, 2.64 gCO_{2-eq}로 나타났다. 이는 돈사에서 발생하는 온실가스 중 N₂O보다 CH₄의 기여도가 높은 것을 시사한다. 해당 연구결과는 모돈사 유래 온실가스 농도와 환경조건에 대한 장기간 측정을 수행한 결과로, 국내 고유배출계수 연구에 유용한 기초자료로 사용될 수 있다. 하지만 축산업 유래 온실가스 배출량에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 따라서 축종별, 사양단계별 배출계수 산정에 대한 추가적인 연구가 이루어져야하며, 보다 신뢰성 있는 데이터 확보를 위해 공인된 온실가스 배출량 산정 프로토콜이 필요할 것으로 사료된다.

사사

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

References

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 1993. 1993 ASHRAE handbook: fundamentals. I-P eds. GA, United State.

Amon B, Kryvoruchk V, Amon T, Zechmeister-Boltenstern S. 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112: 153-162.

Berlin J. 2002. Environmental life cycle assessment (LCA) of Swedish semi-hard cheese. *International Dairy Journal.* 12: 939-953.

Brown HA, Wagner R, Thurtell GW. 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.

Cabaraux JF, Philippe FX, Laitat M, Canart B, Vandenhede M, Nicks B. 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.

Cardador, MJ, Reyes-Palomo C, Díaz-Gaona C, Arce L, Rodriguez-Estévez V. 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.

Crippa M, Guizzardi D, Solazzo E, Muntean M, Schaaf E, Monforti-Ferrario F, Banja M, Olivier JGJ, Grassi G, Rossi S, Vignati E. 2021. GHG emissions of all world countries - 2021 Report. Luxembourg, Europe: Publications Office of the European Union. doi: 10.2760/173513JRC126363

Dowling L, Eaves S, Norton K, Mackintosh A, Anderson B, Hidy A, Lorrey A, Vargo L, Ryan M, Tims S. 2021. Local summer insolation and greenhouse gas forcing drove warming and glacier retreat in New Zealand during the Holocene. *Quaternary Science Reviews.* 266. doi: 10.1016/j.quascirev.2021.107068.

Foster C, Green K, Bleda M, Dewick P, Evans B, Flynn A, Mylan J. 2006. Environmental impacts of food production and consumption. A report produced for the Department for Environment, Food and Rural Affairs.

Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea; GIR. 2020. National Greenhouse Gas Inventory Report 2021, <http://www.gir.go.kr>.

Herrero M, Henderson B, Havlík P, Thornton PK, Conant RT, Smith P, Wirsenius S, Hristov AN, Gerber P, Gill M, Butterbach-Bahl K, Valin H, Garnett T, Stehfest E. 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. In *Nature Climate Change.* 6(5): 452-461. Nature Publishing Group. doi: 10.1038/nclimate2925

- IPCC Emission Factor Database. 2006. Agriculture, Forestry, and Other Land Use. [accessed 2023 June 2]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>
- Jo G, Ha T, Jang Y, Seo S, Jung M. 2020a. A study on ammonia emissions characteristics during growing period of pigs in facility with mechanical ventilation system (in Korean with English abstract). *Journal of Odor and Indoor Environment*. 19(1): 1-10.
- Jo G, Ha T, Yoon S, Jang Y, Jung M. 2020b. Comparison of regression models for estimating ventilation rate of mechanically ventilated swine farm (in Korean with English abstract). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 62(1): 61-70.
- Kebreab E, Clark K, Wagner-Riddle C, France J. 2006. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review. *Canadian Journal of Animal Science*. 86(2): 135-137.
- Midwest Plan Service (MWPS), 1990. Mechanical ventilating systems for livestock housing. 6. 1ed. Iowa State University. IA, United State.
- Monteny GJ, Bannink A, Chadwick D. 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agric. Ecosyst. Environ*. 112: 163-170.
- Noblet J, Le Goff G. 2001. Effect of dietary fibre on the energy value of feeds for pigs. *Anim. Feed Sci. Technol*. 90: 35-52.
- Park S, Jung M, Seo S, Woo S, Hwang O, Park J. 2022. Estimation of ammonia emission factors for a mechanically-ventilated sow facility in fall (in Korean with English abstract). *Journal of Climate Change Research*. 13(4): 501-509.
- Park J, Jo G, Jung M, Jang Y. 2021. Emission characteristics of greenhouse gases (CH₄, N₂O) in mechanically ventilated swine farm during winter season (in Korean with English abstract). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 63(4): 33-41
- Philippe FX, Nicks B. 2015. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 199: 10-25.
- Philippe FX, Laitat M, Wavreille J, Nicks B, Cabaraux JF. 2016. Floor slat openings impact ammonia and greenhouse gas emissions associated with group-housed gestating sows. *Animal*. 10(12): 2027-2033. doi: 10.1017/S1751731116000938.
- Poth M, Focht DD, 1985. 15N kinetic analysis of N₂O production by *Nitrosomonas europaea*: An examination of nitrifier denitrification. *Applied and Environmental Microbiology*. 49: 1134-1141.
- Saha CK, Zhang G, Kai P, Bjerg B. 2010. Effects of a partial pit ventilation system on indoor air quality and ammonia emission from a fattening pig room. *Biosyst. Eng*. 105: 279-287.
- Severinsky. 2020. Greenhouse gasses' effect on atmospheric temperature increase and the observable effects on ecosystems. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering*. 14(12): 362-370. doi: 10.5281/zenodo.4387072.
- Sommer SG, Møller HB. 2000. Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production—effect of straw content. *J. Agric. Sci*. 134: 327-335.
- Stinn JP, Xin H, Shepherd TA, Li H, Burns RT. 2014. Ammonia and greenhouse gas emissions from a modern U.S. swine breeding-gestation-farrowing system. *Atmospheric Environment*. 98: 620-628. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.09.037
- Thompson AG, Wagner-Riddle C, Fleming R. 2003. Emissions of N₂O and CH₄ during the composting of liquid swine manure. *Environmental Monitoring and Assessment*. 91(1): 87-104.
- Titus JG. 1986. Greenhouse effect, sea level rise, and coastal zone management. *Coastal Zone Management Journal*. 14(3): 147-171. doi: 10.1080/08920758609362000
- Ye Z, Zhang G, Seo LH, Kai P, Saha CK, Wang C, Li B. 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.
- Zhang M, Lawlor PG, Li J, Zhan X. 2012. Characteristics of nitrous oxide (N₂O) emissions from intermittently-aerated sequencing batch reactors treating the separated liquid fraction of anaerobically digested pig manure. *Water, Air, & Soil Pollution*. 223(5): 1973-1981.
- Zong C, Li H, Zhang G. 2015. Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 208: 94-105.