

논문

부숙액비 주입 돈사의 암모니아 저감 효과 및 요인 규명

Identification of Ammonia Reduction Effects and Influencing Factors in Pig Barn with the Application of Fermented Liquid Fertilizer

황옥화*, 이준엽, 박준수

농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과

Okhwa Hwang*, Jun Yeob Lee, Junsu Park

Smart Livestock Environment Division, National Institute of Animal Science,
Rural Development Administration, Wanju-gun, Republic of Korea

접수일 2025년 3월 27일
수정일 2025년 5월 4일
채택일 2025년 5월 19일

Received 27 March 2025
Revised 4 May 2025
Accepted 19 May 2025

*Corresponding author
Tel: +82-(0)63-238-7408
E-mail: hoh1027@korea.kr

Abstract This study evaluated the effect of applying fermented liquid fertilizer to the pit of a pig barn on ammonia reduction and analyzed slurry characteristics to identify contributing factors. The experiment was conducted in a mechanically ventilated facility, with 32 pigs per group. Two groups were compared: a control group using water and a treatment group using fermented liquid fertilizer as circulating liquid. Before the experiment, an amount of circulating liquid equivalent to 50% of the expected manure for 21 days was pre-poured into the pit. After 21 days, the slurry was discharged and replaced with new circulating liquid. Ammonia concentrations were measured in real time inside the barn and at the exhaust outlet. Emission rates from exhaust fan were calculated based on ventilation data. Weekly slurry samples were analyzed for physicochemical properties and microbial communities. Results showed that ammonia concentration from inside the barn of the treatment group decreased by up to 33.3%, and the emission rate from exhaust fan dropped by up to 26.2% compared to the control. Annually, ammonia emissions were reduced by 27.3%. This reduction was linked to a 36.1% decrease in the volatilization of free ammonia from ammoniacal nitrogen in the slurry. The reduction was further attributed to increased microbial diversity, which suppressed the dominance of protein-degrading *S. alactolyticus*, thereby limiting ammoniacal nitrogen accumulation. In conclusion, applying fermented liquid fertilizer effectively reduced ammonia emissions by preventing the buildup of ammoniacal nitrogen in slurry. These results demonstrate a 27.3% reduction in the annual ammonia emission factor in pig facilities, providing scientific evidence to support policy initiatives targeting ammonia mitigation in livestock facilities.

Key words: Ammonia, Liquid fertilizer, Microbial community, Pig barn, Water

1. 서론

암모니아(NH₃)는 대기 중 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등과 반응하여 초미세먼지(PM_{2.5})를 생성하는 전구물질로, 국내 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)에 따르면 2021년 기준 연간 총 암모니아 배출량의 77%가 농·축산업에서 배출되었다(CAPSS, 2024; Wyer *et al.*, 2022; Brunekreef and Holgate, 2002). 축산시설의 암모니아 배출

허용기준은 대기환경보전법에서 30 ppm (그 밖의 배출시설)과 악취방지법에서 1 ppm 이하(기타지역)로 규정하고 있다(MOLEG, 2020a; MOLEG, 2011). 산업안전보건법에서는 작업자를 대상으로 한 암모니아 노출 허용기준을 1일 8시간 작업을 기준으로 평균 노출 농도 25 ppm, 15분간의 단시간 노출농도 35 ppm으로 제시하고 있다(MOLEG, 2020b). 이처럼 암모니아는 작업자 건강에 영향을 줄 수 있는 대기오염물질로 관리가 필요하다. 이에 농림축산식품부는 축산시설에서

발생하는 암모니아를 포함한 악취물질을 관리하기 위해 2021년 축산법을 개정하였고(축산업 허가요건에 악취저감 장비·시설 추가), 환경부는 제2차 미세먼지 관리 종합계획(2025~2029년)을 통해 농·축산 분야 암모니아 저감 대책을 수립하였다(MOE, 2024; MOLEG, 2021).

축산시설의 암모니아 저감기술은 액비순환시스템, 탈취탑, 안개분무, 바이오커튼 등이 있으며, 이 중 액비순환시스템은 축산농가에서 가장 선호하는 기술이다(LEMI, 2023). 액비순환시스템은 1964년 미국 MWPS-8 Swine housing and equipment handbook의 manure management에서 lagoon 상등액을 이용한 flushing system과 recirculation 방식으로 소개되었으며, 국외에서는 오래전부터 사용하고 있는 분뇨 재활용 기술이다(MWPS, 1983). 국내에서는 가축분뇨자원화시설 표준설계도에서 축산발효액순환시설로 정의하고 있으며(MOE, 2023a), 돈사에서 배출된 슬러리를 고액분리한 후 호기성 처리를 거쳐 생산된 부숙액비를 돈사 피트로 주입하는 방법으로 설명하고 있다. 액비순환시스템은 돼지 사육농가에서 생산된 부숙액비를 재활용하고, 돈사 악취저감에 효과가 있다고 알려져 대부분의 농가에서 악취저감을 위해 선호하는 기술이다. 왜냐하면 현재 국내 가축분뇨 발생량은 5,087만 1,000톤으로 이 중 84.8%를 퇴·액비로 처리하고 있지만, 지속적인 농경지 감소로 인한 퇴·액비 사용 비율이 감소하는 상황에서 부숙액비를 재활용하는 액비순환시스템은 돼지 사육농가의 분뇨처리 문제를 해소할 수 있는 장점이 있기 때문이다(Agriculture, fish and livestock news, 2025). 이에, 2021~2023년 축산악취개선사업 지원 내역에서도 돼지 사육농가의 악취저감 방법 중 액비순환시스템 신축 및 개보수 항목이 가장 많은 지원을 받았다(LEMI, 2023).

액비순환시스템은 순환시스템의 운영 방식에 따라 연속적 방식과 간헐적 방식으로 나뉜다. 연속적 방식은 24시간 또는 일정기간 연속적으로 슬러리를 배출한 후 부숙액비를 주입하는 것이며, 피트 내 슬러리는 피트 바닥에 설치된 배출구 높이 이상으로 채워지면

배출된다. 이 방식은 악취발생원인 슬러리를 신속하게 배출하여 돈사 악취를 저감하는 효과가 있다(Choi et al., 2022). 그러나 간헐적 방식에 비해 돈사 피트 구조 개선, 슬러리 이송 배관 설치 등 초기 설치비와 운영비가 높고, 액비 저장조의 크기가 최대 40% 크게 운영되어야 하기에 모든 농가에 적용하는데 한계가 있다(Korean pork news, 2024). 또한 농가에 분뇨 처리 용량이 부족하면 분뇨를 충분히 부숙시키지 못해 미부숙 액비를 생산하게 되고, 이를 돈사 피트로 유입시키면 오히려 악취가 증가할 수 있다. 이에, 분뇨 처리 용량이 부족한 농가나 연속적 방식 사용 중 문제가 발생한 농가에서는 간헐적 방식을 이용한다. 간헐적 방식은 일정한 주기로 피트 내 슬러리를 완전히 배출한 후 부숙액비를 주입하는 것으로, 추가적인 시설 공사 없이 기존 분뇨처리시설에서 생산된 부숙액비를 활용할 수 있고 연속적 방식을 사용하는 농가에서도 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 슬러리 배출 주기가 길어지면 악취저감 효과가 감소할 가능성이 있다(Ha, 2023; NIAS, 2021).

액비순환시스템의 악취저감 효과 평가에 관한 연구는 실험실 규모와 현장 규모로 구분할 수 있다. 실험실 규모 연구는 슬러리와 부숙액비의 비율에 따른 공기 중 악취 농도, 슬러리 이화학 성분 및 미생물 군집 분석을 통해 슬러리 희석 비율에 따른 악취저감 효과를 평가하였다(Hwang et al., 2024, 2021). 현장 규모 연구는 일반 돈사와 액비순환시스템 적용 돈사의 악취와 슬러리 성분을 분석하여 실제 농가에서의 악취저감 효과를 제시하였다. 현장 규모에서, 연속적 방식 액비순환시스템 돈사에서 배출되는 공기 중의 암모니아 농도(6.73 ppm)가 일반 돈사(17.73 ppm)에 비해 62.1% 감소하였다(Choi et al., 2022). 그리고 일일 3회 부숙액비를 주입하는 반·연속 방식의 경우, 최대 49%의 암모니아 배출이 감소되었다(Wi et al., 2019). 이외에도 현장 규모 연구는 대부분 연속적 방식 액비순환시스템 운영에 따른 돈사 악취저감 및 슬러리 성분 개선 효과를 평가하였으며, 간헐적 방식은 실시간 암모니아 측정이 아닌 주 1회 측정을 통한 평가 사례만 있었다(Jang et al., 2021). 그리고 액비순환시스템은

돈사 피트에서 슬러리를 배출한 뒤 부속액비를 주입하여 악취발생원인 슬러리의 저장기간 단축 및 희석 효과로 악취 배출이 감소한다. 악취저감 요인은 두 가지 외에도 부속액비 자체 성능(이화학적 성분, 미생물 활동)이 복합적으로 작용하는데, 기존 연구에서는 복합작용에 대한 효과를 평가함으로써 부속액비 자체 성능에 대해서는 명확히 확인하지 못하였다.

따라서 본 연구의 목적은 액비순환시스템의 현장 활용도를 확대하기 위해 연속적 방식이 아닌 간헐적 방식에 대한 암모니아 저감 효과와 요인을 규명하였다. 암모니아 저감 효과는 돈사 내부와 배기구로 구분하여 첫 번째, 돈사 내부는 암모니아 농도에 대한 저감 효과, 두 번째 배기구는 암모니아 농도를 이용하여 산정한 암모니아 배출계수의 저감 효과를 제시하였다. 암모니아 저감 요인은 슬러리 이화학적 특성과 미생물 군집을 분석하여 규명하였다.

2. 연구 방법

2.1 시험돈사 및 환기량 측정

시험돈사는 강제 환기식 밀폐형 구조로, 내부 돈방은 4개의 팬으로 구획되었다(그림 1a). 돈방에는 개시 체중 45 kg 돼지를 각 처리구당 32두씩 배치하였다.

돈방의 환기 방식은 측면 입기구(직사각형, 400 mm × 162 mm)로 공기가 유입되면, 돈방 내부 천장에 설치된 플랩이 달린 배기구(φ 710 mm)로 공기가 배출되었다. 환기량은 베인형 풍속계(Model 435, Testo, USA)를 이용하여 배기구 내부의 16개 지점에서 풍속을 측정 후, 평균값을 구하고 이를 배기구 단면적과 곱하여 산출하였다(그림 1b). 환기량은 주 1회씩 측정하였으며, 순환수 주입 차수별로 총 3회 산출하였다. 그 결과, 순환수 1차 주입에서 대조구 돈방의 환기량은 $0.67 \pm 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$, 처리구 돈방은 $0.69 \pm 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 이었으며, 순환수 2차 주입에서는 대조구 $0.66 \pm 0.03 \text{ m}^3/\text{s}$, 처리구 $0.65 \pm 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산출되었다. 돈방 환기량은 순환수 주입 차수 및 처리구 간에 유의적 차이가 없었다($P > 0.05$). 그리고 시험기간 동안 돈방 내부 온도는 대조구 $22.0^\circ\text{C} \pm 3.1^\circ\text{C}$, 처리구 $21.9^\circ\text{C} \pm 3.3^\circ\text{C}$ 로 차이가 없었다.

2.2 순환수 주입 조건

본 연구에서는 순환수로 대조구는 물을, 처리구는 부속액비(가축분뇨공동자원화센터, 김제시)를 사용하였다. 대조구로 물을 사용한 이유는 부속액비 주입에 따른 희석 효과를 배제하고, 부속액비 자체의 성능을 평가하기 위해서이다. 순환수 주입량은 국내 양돈 전문지(월간한돈, 2023년 11월호)에서 현재 액비순환

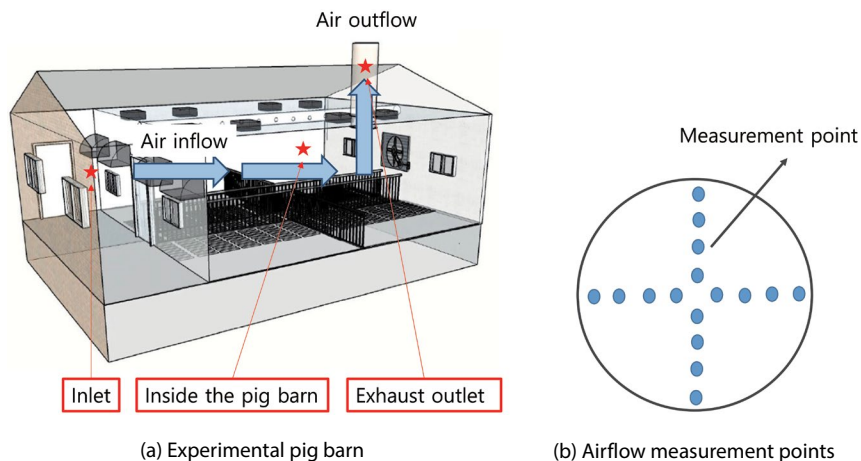


Fig. 1. Experimental pig barn and airflow measurement points.

시스템 운영이 잘되고 있는 농장들에 대한 조사결과를 종합한 실무 데이터를 참고하여 설정하였다. 양돈 전문지에 따르면, 간헐적 방식 액비순환시스템을 운영하는 양돈농가에서는 돈사 피트의 약 50%를 부속 액비로 채운 후 2~3주 간격으로 슬러리를 배출한 뒤 다시 부속액비를 주입하는 방식을 권장하였다(Ha, 2023). 그러나 해당 문헌에서는 돈사 내 사육두수, 분뇨 배출량, 피트 부피 등의 구체적인 정보가 제시되지 않아, 순환수 주입 양을 정확히 산출하는데 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 해당 자료를 참고하여, 사육두수에 기반한 분뇨 배설량을 이용하여 산식 1 (Eq. 1.)과 2 (Eq. 2.)와 같이 순환수 주입량을 정량적으로 산출하였다. 자세히 설명하면, 산식 1에서 육성·비육돈 분뇨 배설량을 이용하여 돈방 내 사육 중인 돼지 32두가 21일(슬러리 배출 간격, 3주) 동안 배설하는 분뇨량을 계산하였다. 산식 2에서는 이 분뇨량의 50%에 해당하는 순환수 양을 산출하였다. 양돈 전문지에서는 돈사 피트의 약 50%에 해당하는 순환수 주입을 언급하였으나, 농가마다 돈사 피트 부피에 차이가 있기에 본 연구에서는 분뇨량에 기반하여 순환수 주입량을 계산하였다. 즉, 21일 동안 돈사 피트에 저장되는 분뇨량과 순환수 양이 최종 2:1이 되도록 하여 순환수 양이 분뇨량의 50%가 되도록 하였다. 순환수는 200 L 플라스틱 통을 이용하여 계량한 후 피트에 골고루 부어주었고, 순환수 1차 주입 후 21일이 경과한 뒤에 피트 내 슬러리를 완전히 배출한 후 다시 순환수를 주입(순환수 2차 주입)하였다.

$$\begin{aligned} \text{Eq. 1. Manure excretion in the pig barn (kg)} \\ &= \text{Manure excretion 4.76 kg/head/day} \\ &\quad \times 32 \text{ heads} \times 21 \text{ days} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eq. 2. Circulating liquid pouring volume (kg)} \\ &= \text{Manure excretion in the pig barn (kg)} \\ &\quad \times \text{Dilution volume 50\%} \end{aligned}$$

2.3 암모니아 농도 측정 및 배출계수 산정

암모니아 농도는 멀티샘플러(Multisampler; INNOVA 1409)가 장착된 광음향 분광분석장치(Pho-toacoustic spectrometer; INNOVA 1512, Lumasense

Technologies, Denmark, Detection limit 0.2 ppm)를 활용하여 실시간으로 측정하였다. 측정 지점은 돈방 내부로 공기가 유입되는 복도에 위치한 입기구(Inlet), 돈방 내부의 중앙지점(Inside the pig barn), 그리고 돈방 배기구의 중앙(Exhaust outlet)으로 설정하였으며(그림 1a), 측정 간격은 1시간이었다. 암모니아 측정 장비는 시료 1개당 측정 시간이 총 66초(가스 흡입 5초, 측정 50초, 플러싱 11초)이며, 최소 1 ppm 이하의 암모니아 농도를 확인할 수 있다. 측정 장비는 사용 전에 질소 가스(Daedeck gas, 99.999%, Republic of Korea)와 암모니아 표준 가스(Rigas, Republic of Korea)를 이용하여 교정 및 검량선을 작성하였다. 검량선은 총 7개 농도의 암모니아 표준가스(0, 5, 10, 20, 25, 30, 50 ppm)를 사용하여 작성하였다. 암모니아 배출계수는 환기량 계산이 가능한 돈방 배기구의 암모니아 농도를 이용하여 산식 3 (Eq. 3)과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{Eq. 3. Ammonia emission rate (g/h)} \\ &(\text{Outlet ammonia (ppm)} - \text{Inlet ammonia (ppm)}) \\ &\quad \times \frac{17.03 \text{ (g/mol)}}{24.45 \text{ (L/mol)}} \times \frac{273.16 \text{ K}}{(273.16 \text{ K} + 20^\circ\text{C})} \\ &\quad \times \text{Ventilation rate (m}^3\text{/s)} \times 3.6 \end{aligned}$$

2.4 슬러리 이화학 성분 분석

분석용 슬러리는 순환수 주입 후 1일, 7일, 14일, 21일에 돈방 내 4구획으로 구분된 피트에서 각각 채취하였으며, 각 피트별로 6개 지점에서 슬러리를 채취한 후 혼합하였다. 이화학 성분은 수질오염공정시험기준(MOLEG, 2024)에 준하여 pH, 전기전도도(Electrical conductivity; ES 04310.1c), 총고형물(Total solid; ES 04303.1b, ES 04851.1), 화학적산소요구량(Chemical oxygen demand; ES 04315.1b), 총질소(Total nitrogen; ES 04363.1a), 총 킬달질소(Total Kjeldahl nitrogen; ES 04363.3b), 암모니아성 질소(Ammoniacal nitrogen; ES 04355.1c) 및 질산성 질소(Nitrate nitrogen; ES 04361.1b)를 분석하였다. pH는 암모니아와 암모니아성 질소의 평형에 영향을 주는 주요 인자로 pH가 높으면 암모니아 휘산이 증가한다. 전기전도도

는 슬러리 내 암모니아성 질소 농도를 간접적으로 추정할 수 있으며, 양이온인 암모니아성 질소 농도가 높으면 전기전도도가 높아진다. 총고형물과 화학적산소 요구량은 미생물 증식에 이용되는 유기물 농도에 대한 지표로써 미생물 활동에 따른 암모니아성 질소 농도의 증감을 설명할 수 있다. 총질소, 총 킬달질소, 암모니아성 질소 및 질산성 질소는 슬러리 내 질소 대사 경로를 구성하는 주요 지표로써 암모니아 생성과 전환 과정에 직접적으로 관련이 있다(Serra-Toro *et al.*, 2024; Qu and Zhang, 2021; Garcia-Gonzalez and Vannotti, 2015). 분석 방법을 정리하면, pH와 전기전도도는 각 프로브가 장착된 분석 장비(Model 850C, Schott, Germany)를 이용하여 측정하였다. 본 장비는 pH 프로브의 측정 범위 pH -2.000~pH +19.999, 정밀도 pH ± 0.005 와 mV 프로브의 측정 범위 -999.9 mV~+999.9 mV, 정밀도 ± 0.3 mV의 사양을 갖추었다. 총고형물은 자기 도가니에 슬러리를 넣고 110°C에서 24시간 건조한 후 건조 전과 후의 무게를 측정하였다. 화학적산소요구량은 슬러리에 황산(Sulfuric acid, H₂SO₄)을 넣고 반응시킨 후 과망간산칼륨(Potassium permanganate, KMnO₄) 용액을 첨가하여 중탕하고, 옥살산나트륨(Sodium oxalate, Na₂C₂O₄) 용액과 과망간산칼륨 용액을 이용하여 적정하였다. 총질소는 수산화나트륨(Sodium hydroxide, NaOH)과 과황산칼륨(Potassium persulfate, K₂S₂O₈)이 혼합된 알칼리성 과황산칼륨 용액과 슬러리를 혼합한 후 120°C에서 30분간 가열하고, 방냉한 후 시료 일부를 취하여 염산 용액과 혼합한 뒤 UV spectrometer (220 nm)로 흡광도를 측정하였다. 총 킬달질소와 암모니아성 질소는 킬달 장치(Vapodest 50s, Gerhardt GmbH, Germany)를 이용하여 분석하였으며, 총 킬달질소 분석시료는 슬러리, 과염소산(Perchloric acid, HClO₄) 및 황산(Sulfuric acid, H₂SO₄)을 혼합하여 준비하였고, 암모니아성 질소 분석시료는 슬러리에 산화마그네슘(Magnesium oxide, MgO)을 첨가하여 준비하였다. 킬달 장치는 용해 시간 2~4분, 회수율 99.5% 이상, 재현성 ± 1 및 검출한계 0.1 mg-N의 사양을 갖추었다. 질산성 질

소는 탄산나트륨(Sodium carbonate, Na₂CO₃), 탄산수소나트륨(Sodium hydrogen carbonate, NaHCO₃) 및 황산으로 전처리한 슬러리를 이온크로마토그래피(930 Compact IC Flex, Metrohm, USA)로 분석하였다. 분석 장비는 0.1%의 정확도 및 정밀도, 유량 범위 10 μ L/min~20 mL/min, 오븐 온도 범위 0~80°C(안정도 >0.05°C), 내부 순환 양 1 μ L의 사양을 가지고 있다.

2.5 미생물 군집 분석

미생물 군집은 차세대 염기서열 분석(Next generation sequencing, NGS) 기법을 이용하여 metagenome을 분석하였다. 이 분석 기법은 V3~V4 영역을 증폭하는 Bakt_341F (CCT ACG GGN GGC WGC AG)와 Bakt_805R (GAC TAC HVG GGT ATC TAA TCC) primer를 이용하여 DNA를 증폭한 후 amplicon sequencing이 진행되었다. 증폭된 서열은 DADA2 프로그램을 이용하여 정리한 후 NCBI Blast (<https://www.blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>)로 미생물 다양성 및 미생물 군집의 상대적인 비율(Relative abundances)을 분석하였다(Macrogen Inc., Republic of Korea).

2.6 통계분석

대조구와 처리구의 분석 결과 간에 유의적 차이를 분석하기 위해 SAS version 9.2 (SAS, 2016)를 이용하였다. 처리구 간의 유의적 차이는 일반선형모델(General linear model)로 분석한 후 $P < 0.05$ 일 때 통계적 유의차가 있음을 판단하였다. 본 연구의 분석 결과는 엑셀 2016 (Microsoft Excel 2016 version)을 이용하여 그래프화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 암모니아 저감 효과

3.1.1 돈방 내부의 암모니아(Ammonia) 농도

돈방 내 암모니아 농도(그림 2)는 순환수 1차 주입

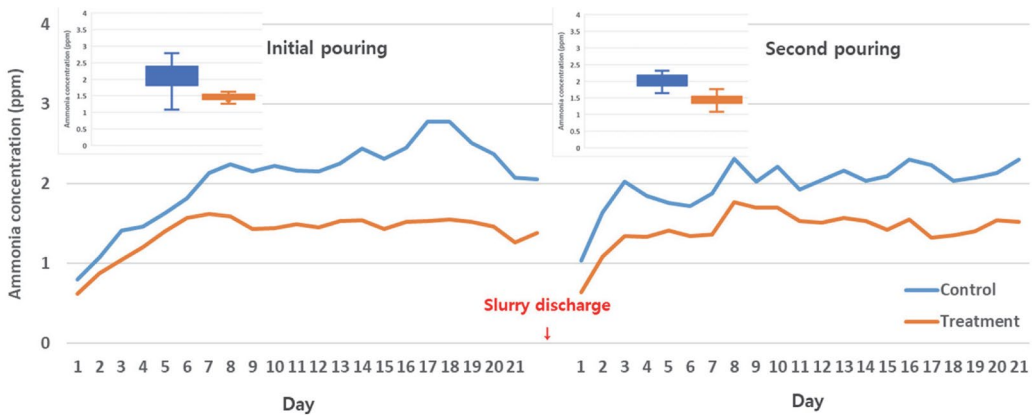


Fig. 2. Ammonia concentration inside the pig barn according to type of circulating liquid into the pit. A box plot was displayed in the upper left corner to explain the distribution characteristics of ammonia concentration.

(Initial pouring)에서 대조구(Control)는 $0.8 \pm 0.2 \sim 2.8 \pm 0.6$ ppm (평균 2.1 ± 0.4 ppm), 부속액비를 주입한 처리구(Treatment)는 $0.6 \pm 0.2 \sim 1.6 \pm 0.3$ ppm (평균 1.4 ± 0.2 ppm)으로 측정되었으며, 순환수 주입 7일 후부터 대조구에 비해 처리구에서 유의적으로 낮은 농도를 보였다($P < 0.05$). 측정 기간 21일 동안 암모니아 농도는 처리구에서 13.7~44.7% (평균 33.3%) 감소하였다. 그리고 돈사 피트에서 슬러리를 배출한 후 순환수 2차 주입(Second pouring)에서는 대조구 $1.0 \pm 0.3 \sim 2.3 \pm 0.4$ ppm (평균 2.0 ± 0.4 ppm), 처리구 $0.6 \pm 0.2 \sim 1.8 \pm 0.2$ ppm (평균 1.4 ± 0.2 ppm)으로 측정되었으며, 일부 측정일을 제외하면 1차 주입과 같이 순환수 주입 7일 후부터 처리구에서 유의적으로 낮았다($P < 0.05$). 순환수 2차 주입에서 측정 기간 21일 동안 돈방 내 암모니아 농도는 대조구에 비해 처리구에서 16.2~40.7% (평균 30.0%) 감소하였다.

3.1.2 돈방 배기구의 암모니아 배출계수 (Ammonia emission rate)

배기구에서 측정된 암모니아 농도로 산정한 암모니아 배출계수(그림 3)는 순환수 1차 주입에서 대조구는 $1.5 \pm 0.3 \sim 5.7 \pm 0.7$ g/h (평균 4.2 ± 0.5 g/h), 처리구는 $1.4 \pm 0.4 \sim 3.5 \pm 0.5$ g/h (평균 3.1 ± 0.5 g/h)로 측정 기간 21일 동안 처리구에서 3.1~41.7% (평균 26.2%) 감소하

였고, 순환수 2차 주입에서는 대조구가 $2.3 \pm 0.5 \sim 4.6 \pm 0.5$ g/h (평균 4.0 ± 0.4 g/h), 처리구가 $1.5 \pm 0.4 \sim 3.9 \pm 0.4$ g/h (평균 3.1 ± 0.4 g/h)로 처리구에서 8.5~36.0% (평균 22.5%) 감소하였다. 측정기간 동안 처리구 간의 암모니아 배출계수는 돈방 내부 암모니아 농도와 같은 패턴의 유의적인 차이를 나타내었다($P < 0.05$). 결과를 종합하면, 피트에 부속액비를 주입한 돈방에서 암모니아 농도는 최대 33.3%, 암모니아 배출계수는 최대 26.2% 감소하였다. 그리고 시험기간 21일 동안 각 처리구의 평균 암모니아 배출계수와 돈방 사육두수를 이용하여 연간 배출계수를 산정하였다. 그 결과, 대조구는 1.1 kg/head·yr, 처리구는 0.8 kg/head·yr로 국내 육성·비육돈 돈사 내 암모니아 배출계수 국가 통계인 1.1 kg/head·yr과 유사하였다(MOE, 2023b). 연간 암모니아 배출계수는 부속액비 주입 돈방에서 약 27.3% 감소하였다.

3.2 슬러리 이화학 특성을 이용한 암모니아 저감 요인 분석

3.2.1 처리구별 슬러리 이화학적 특성

부속액비 주입 돈방에서 암모니아 배출이 감소한 요인을 규명하기 위해 슬러리 이화학 성분 중 암모니아 발생과 관련된 질소 성분(총질소, 총 킬달질소, 암

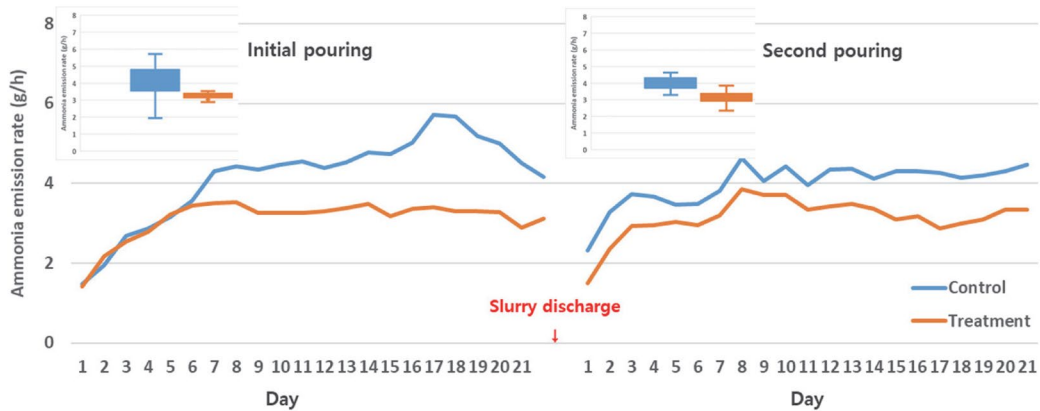


Fig. 3. Ammonia emission rate at the exhaust outlet according to type of circulating liquid into the pit. A box plot was displayed in the upper left corner to explain the distribution characteristics of ammonia emission rate.

모니아성 질소)의 농도 변화를 처리구별로 정리하였다. 대조구에서 질소 성분의 농도는 순환수 1차 주입(Initial pouring)에 비해 2차 주입(Second pouring) 시 증가하였지만, 처리구에서는 순환수 1차 주입과 2차 주입 간에 유사하였다(그림 4a). 순환수 1차 주입에서는 순환수 주입 후 21일째, 암모니아성 질소 농도만이 대조구 대비 처리구에서 감소하였지만($P < 0.05$), 순환수 2차 주입에서는 순환수 주입 후 7일부터 모든 질소 성분의 농도가 처리구에서 유의적으로 감소하였다($P < 0.05$; 그림 4a). 여기서 암모니아성 질소는 공기 중 암모니아 생성에 직접적 영향을 가진 물질로, 슬러리 pH와 돈방 내부 온도를 이용하여 슬러리에 존재하는 자유 암모니아 농도(휘산될 가능성이 있는 암모니아)를 추정하여 처리구 돈방의 암모니아 감소 요인을 분석하였다(Renard *et al.*, 2004). 자유 암모니아 농도(그림 4b의 첫 번째 그래프)는 슬러리 내 암모니아성 질소 농도의 변화 패턴과 동일하였으며, 이는 슬러리 pH와 돈방 내부 온도가 처리구 간에 유의적 차이가 없었기 때문이다(2.1 시험돈사 및 환기량에 결과 제시). 본 연구 결과에서 슬러리 pH가 7일 경우, 슬러리 내 자유 암모니아는 전체 암모니아성 질소의 1% 미만으로 존재하고, 공기 유동이 제한적인 돈사 피트에서는 돈방 내부로 암모니아가 휘산되는 농도가 낮다(Serra-Toro *et al.*, 2024; Nordgard *et al.*, 2017). 이러

한 조건에서 돈방 내부로 휘산될 암모니아 농도를 추정한 결과가 그림 4b의 두 번째 그래프와 같으며, 대조구에 비해 처리구에서 순환수 1차 주입 시 13.0~27.5% (평균 19.2%), 2차 주입 시 23.8~44.5% (평균 36.1%) 감소하였다. 이 결과는 3.1.1 돈방 내부의 암모니아 농도에서 제시한 처리구 돈방의 암모니아 저감율과 정확히 일치하지 않으나 평균 30% 이상의 저감 효과를 나타내는 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 따라서 처리구의 암모니아 감소 요인은 슬러리 내 암모니아성 질소 농도가 대조구에 비해 감소한 것에 영향을 받은 것을 알 수 있었다. 그렇다면 처리구 간 암모니아성 질소 농도의 차이를 규명해보기 위해, 암모니아성 질소와 유기질소의 농도비를 산출하였다.

3.2.2 암모니아성 질소와 유기질소의 농도비

암모니아성 질소는 미생물의 단백질 분해 과정에서 생성되는 대사산물로, 미생물의 성장 에너지원과 세포 구성 요소로 사용된다. 유기질소는 총 킬달질소에서 암모니아성 질소를 제외한 값으로, 미생물의 에너지원으로 이용된 후 대사 과정을 거쳐 암모니아성 질소로 전환된다(Paredes *et al.*, 2007). 대조구에서 암모니아성 질소(3477.5 mg/L) 대 유기질소(865.9 mg/L)의 농도비는 최대 4.0:1로 암모니아성 질소 농도가 상대적으로 높았다. 반면, 대조구와 동일한 측정 시기일

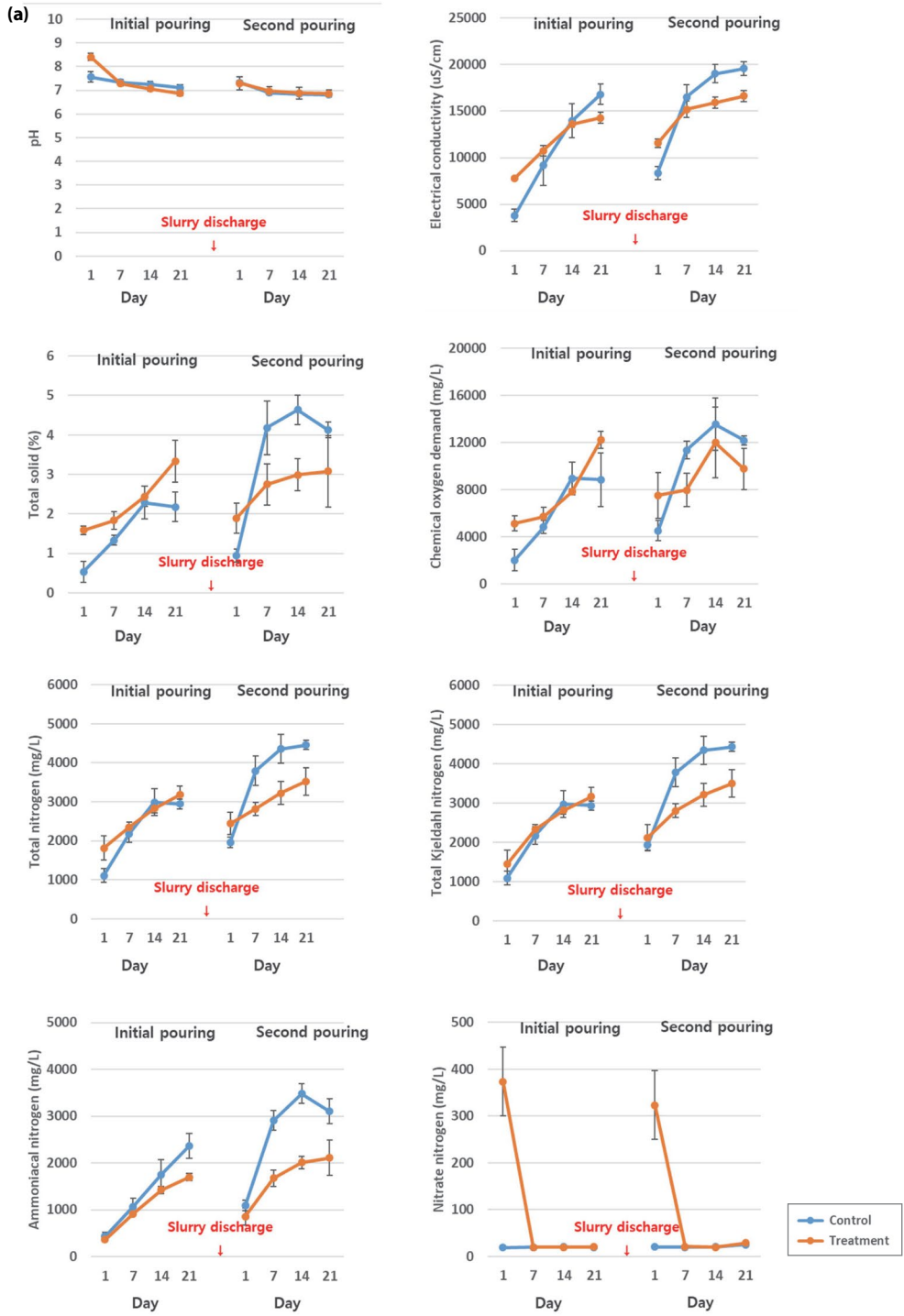


Fig. 4. Physicochemical properties in the slurry according to type of circulating liquid into the pit. (a) Concentration of each substance, (b) Estimated concentrations of free ammonia in slurry and ammonia volatilized into the air, calculated based on the ammoniacal nitrogen concentration and pH in the slurry, and the inside pig barn temperature for each treatment.

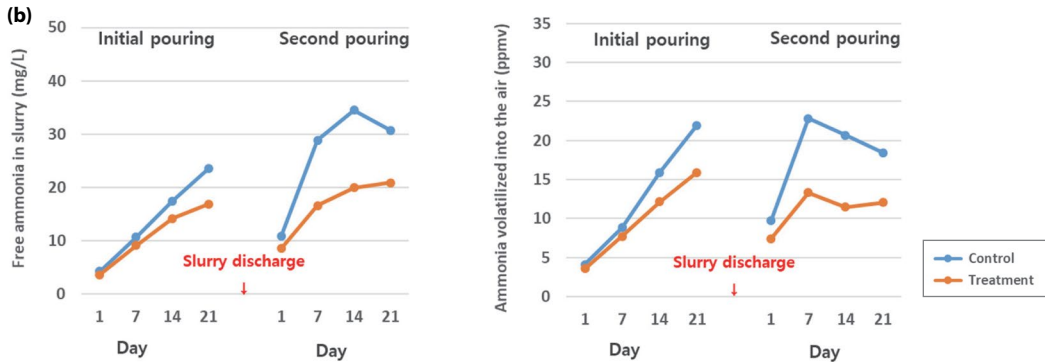


Fig. 4. Continued.

때 처리구에서 두 성분의 농도비는 최대 1.7 (2009.3 mg/L) : 1 (1199.6 mg/L)로, 큰 차이를 보이지 않았다 (그림 4a). 대조구에 비해 처리구에서 두 성분의 농도비가 유사한 것은 암모니아성 질소와 유기질소가 슬러리 내 미생물 활동을 위해 균형 있게 이용되었기 때문으로 판단된다. 반면, 대조구는 유기질소 대비 암모니아성 질소 비율이 높은 것으로 보아, 미생물이 이용하지 못한 암모니아성 질소가 지속적으로 슬러리에 축적되었음을 알 수 있었다. 슬러리 내 암모니아성 질소의 축적은 공기 중 암모니아 휘산 증가로 이어지며 (Wang *et al.*, 2014), 대조구에서 더 높은 수준의 암모니아 배출이 관찰된 것이다(그림 2, 3). 미생물 활동에 대해서는 3.3 단락에서 자세히 설명하였다.

3. 2. 3 질산성 질소(Nitrate nitrogen; NO₃-N)와 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand; COD)

부숙액비 자체 (표 1)와 부숙액비를 주입한 처리구 (그림 4)에서 특이적으로 검출된 성분으로 질산성 질소가 있었다. 질산성 질소는 부숙액비 제조과정 중 슬러리 폭기에 의한 암모니아성 질소 산화로 생성되었다 (Han *et al.*, 2021; Paredes *et al.*, 2007). 질산성 질소는 돈방 피트와 같이 산소가 부족한 환경에서는 슬러리 내 유기물 분해 과정의 전자수용체로 작용하여 화학적 산소요구량의 증가를 억제한다 (Yao *et al.*, 2020; Jena *et al.*, 2016). 그림 3에서, 처리구의 질산성 질소

Table 1. Physicochemical properties of water and liquid fertilizer.

	Water	Liquid fertilizer	
		Initial pouring	Second pouring
pH	7.4	6.2	5.4
Electrical conductivity (μS/cm)	113	9010	9900
Total solid (%)	0	1.7	1.5
Chemical oxygen demand (mg/L)	0	4970	5300
Total nitrogen (mg/L)	0	1530	1756
Total Kjeldhal nitrogen (mg/L)	0	543	1053
Ammoniacal nitrogen (mg/L)	0	1.6	1.1
Nitrate nitrogen (mg/L)	1.9	986	703

는 순환수 주입 후 7일 동안 90% 이상 제거되었다(순환수 1차 주입 시 94.6%, 2차 주입 시 93.6%가 감소). 이 기간 동안 처리구의 화학적 산소요구량은 순환수 1차 주입 후 9.82% (5133 mg/L → 5693), 2차 주입 후 5.8% (7505 mg/L → 7970) 증가하였다. 반면, 대조구에서는 순환수 1차 주입 후 58.14% (2014 mg/L → 4813), 2차 주입 후 60.2% (4515 mg/L → 11350)로 처리구 대비 급격히 증가하였다. 이는 대조구에서는 질산성 질소가 거의 존재하지 않아 지속적인 분뇨 유입으로 인해 화학적 산소요구량이 가파르게 증가한 반면, 처리구에서는 슬러리 내 질산성 질소가 유기물 분해 과정에서 산소요구량의 일부를 대체하여 화학적 산소요구량의 증가를 저해하였다.

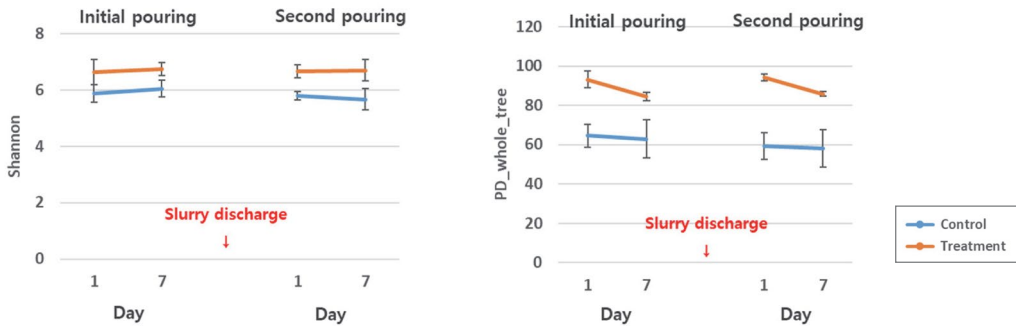


Fig. 5. Microbial diversity index.

3.3 슬러리 미생물 군집(Microbial communities)을 이용한 암모니아 저감 요인 분석

슬러리 내 질소 성분의 변화에 대한 미생물 활동을 구체적으로 분석하기 위해, 차세대 염기서열 분석 기법을 활용하여 미생물 다양성과 군집을 조사하였다. 미생물 분석은 순환수 주입 후 1일과 7일에 채취한 슬러리를 이용하였다. 그 이유는 순환수 주입 후 7일 동안 질소 성분의 농도 변화가 두드러졌고, 특히 순환수 2차 주입 후 7일에 처리구 간의 농도 차이가 뚜렷하게 나타났기 때문이다.

3.3.1 미생물 다양성(Microbial diversity)

미생물 다양성 지표인 Shannon 지수와 PD_whole_tree 값은 대조구보다 처리구에서 유의적으로 높았다 ($P < 0.05$; 그림 5). Shannon 지수는 미생물 군집의 종 풍부도(species richness)와 균등도(evenness)를 반영하며, 값이 클수록 미생물 종이 균형 있게 분포함을 의미한다. PD_whole_tree 값은 미생물의 계통학적 다양성(phylogenetic diversity)을 나타내며, 값이 클수록 생태학적 다양성이 높다(Yang *et al.*, 2018; Kumari *et al.*, 2015). 처리구에서 미생물 다양성이 높은 것은 부속액비에 포함된 미생물이 슬러리 내 다양한 미생물의 공존을 촉진했기 때문으로 판단된다(Becker *et al.*, 2012). 부속액비에서 검출된 주요 미생물은 *Clostridium jeddahitimonense* (상대적 비율 8.1%), *Litorilinea*

aerophila (9.7%), *Thauera humireducens* (6.7%), *Pseudazocarcus pumilus* (6.5%), *Nitrospira lenta* (3.9%) 등이 있었다. 이 중 *Litorilinea aerophila* (Kim and Oh, 2021), *Thauera humireducens* (Patal *et al.*, 2024; Dong *et al.*, 2017) 및 *Pseudazocarcus pumilus* (Reyes-Umana *et al.*, 2023)는 탈질(Denitrification) 미생물로 슬러리 내 질산성 질소를 전자수용체로 이용하여 유기물 분해에 관여한다. 그리고 유기물 분해로 생성된 암모니아성 질소, 유기산 등의 대사산물을 에너지원으로 활용함으로써 유기물 분해와 대사산물 활용이 균형을 이룰 수 있다(Meng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017). 이에 부속액비를 주입한 처리구에서는 암모니아성 질소(대사산물) 대 유기질소(유기물) 비율(최대 1.7 : 1)이 유사한 수준으로 유지되었고, 다양한 미생물이 공존하는 환경이 되었을 것이다. 반면, 대조구는 미생물 다양성이 낮은 것으로 보아 특정 미생물이 우점하는 환경이 형성되었으며(그림 5), 이는 특정 대사산물이 과량 생성될 가능성을 높인다(Meng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017). 실제로 대조구 슬러리의 암모니아성 질소 대 유기질소 비율이 4.0 : 1로 나타나 암모니아성 질소가 과도하게 축적되었음을 알 수 있었다(그림 4a).

3.3.2 주요 미생물 군집(Major microbial communities)

슬러리 내 주요 미생물 군집은 전체 미생물 군집 중 상대적 비율(Relative abundances)이 높은 미생물을

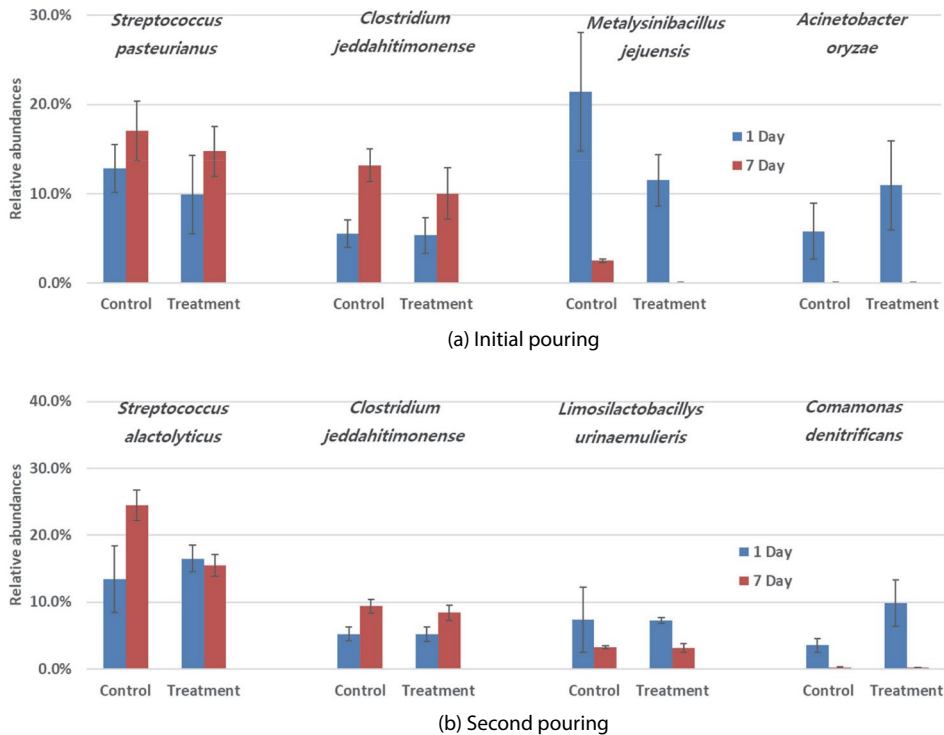


Fig. 6. Relative abundances of major microbial communities.

선별하였다(그림 6). 순환수 1차 주입(그림 6a)에서는 *Streptococcus pasteurianus* (*S. pasteurianus*)의 상대적 비율이 순환수 주입 후 7일에 대조구(17.0%)보다 처리구(14.8%)에서 2.2% 낮았다. *S. pasteurianus*는 단백질을 분해하여 암모니아성 질소를 생성하는 미생물로 (Papadimitriou *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2012), 비록 처리구 간에 유의적 차이는 없었으나($P > 0.05$) 부숙액비를 주입한 처리구에서 소폭 감소하여 장기적으로 암모니아성 질소 축적을 저해하는데 기여하였을 것으로 판단된다. 그 이유는 돈방 내 피트와 같이 분뇨(미생물 영양소)가 지속적으로 공급되고 슬러리 pH가 7인 조건에서는, 슬러리에 우점한 미생물이 특별한 스트레스가 가해지지 않는 한 지속적으로 증식할 수 있다 (Shade *et al.*, 2012). 현재 대조구에서 상대적 비율이 높은 *S. pasteurianus*는 시간 경과에 따라 다른 미생물에 비해 경쟁적 우위를 유지할 가능성이 높다. 이에

장기적으로 대조구에서 단백질 분해로 인한 암모니아성 질소의 축적이 증가하게 되고, 이는 대조구에 비해 처리구에서 암모니아성 질소 농도가 더 낮아지는 결과로 이어짐을 시사하였다.

순환수 2차 주입(그림 6b)에서는 *Streptococcus alactolyticus* (*S. alactolyticus*)가 높은 비율을 차지하였으며, 대조구에서는 순환수 주입 후 1일(13.4%)보다 7일(24.5%)에 11.1% 증가하였다($P < 0.05$). 반면 처리구에서는 1일(16.5%)과 7일(15.5%) 간에 큰 차이가 없었다($P > 0.05$). *S. alactolyticus*는 슬러리 내 단백질을 분해하는 urease 양성 미생물로 요소(urea)를 분해하여 암모니아와 이산화탄소를 생성한다. 슬러리에 이 미생물 비율이 증가하면 산식 4 (Eq. 4)의 반응식 통해 암모니아를 생성하고, 슬러리 pH 7 조건에서 암모니아와 암모니아성 질소는 평형을 이루어 슬러리 내 암모니아성 질소 농도가 증가하게 된다(Sheng *et*

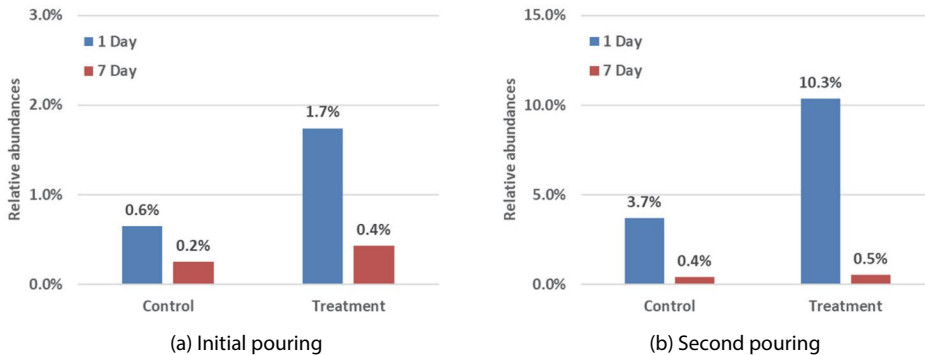
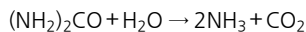


Fig. 7. Relative abundances of denitrifying microbial communities.

al., 2015; Chen *et al.*, 2008; Hojherg *et al.*, 2005). 순환수 주입 후 7일에 이 미생물의 비율이 대조구에서 증가한 것은 슬러리 내 암모니아성 질소 농도의 증가와 관련되며, 이는 본 연구 결과에서 확인되었다(그림 4a, Second pouring of ammoniacal nitrogen). 순환수 주입 후 7일째 *S. alactolyticus* 비율은 대조구에 비해 처리구에서 9% 낮았으며, 이때 슬러리 내 암모니아성 질소 농도가 처리구에서 33.9% 감소한 것을 알 수 있었다. 그리고 대조구 슬러리에서 우점한 미생물은 시간이 경과함에 따라 지속적으로 증식하며 암모니아성 질소를 축적할 것이다(Shade *et al.*, 2012). 그 결과, 순환수 주입 21일 후 대조구에서는 암모니아성 질소 농도가 증가한 반면 처리구에서는 상대적으로 농도가 감소하는 경향이 관찰된 것이다(그림 4a).

Eq. 4. Urea degradation mechanism leading to ammonia formation



한편, 순환수 주입 7일 후에 상대적 비율이 감소한 미생물로 *Acinetobacter oryzae* (*A. oryzae*; 그림 6a)와 *Comamonas denitrificans* (*C. denitrificans*; 그림 6b)가 있었다. *A. oryzae*는 질소 고정 능력을 가진 호기성 미생물(Chaudhary *et al.*, 2012)로 부속액비 제조 과정에서 증식하였지만, 산소가 부족한 돈사 피트에서는 생존하지 못하였다. *C. denitrificans*는 탈질 미생물로 질산성 질소를 전자수용체로 활용한다(Gumaelius *et*

al., 2001). 탈질 미생물에 대해서는 다음의 3.3 탈질 미생물 단락에서 상세히 다루었다.

3. 3. 3 탈질(Denitrification) 미생물

탈질 미생물은 질화(Nitrification) 미생물이 생성한 질산성 질소를 전자수용체로 활용하고, 유기물을 전자공여체로 이용하여 혐기성 호흡을 통해 질소 가스를 생성한다(Gao *et al.*, 2024). 본 연구에서는 *Comamonas denitrificans* (Gumaelius *et al.*, 2001), *Denitrificimonas caeni* (Strand, 2024) 및 *Thiopseudomonas denitrificans* (Tan *et al.*, 2015)가 검출되었으며, 이들의 상대적 비율의 합을 그림 7에 정리하였다. 탈질 미생물의 비율은 처리구에서 높았으며, 이들은 분뇨 내 휴면상태로 있다가 부속액비에 포함된 질산성 질소를 전자수용체로 활용하여 활성화되었다. 그러나 부속액비 주입 후 7일 동안 대부분 제거되었으며, 이는 같은 기간 동안 슬러리 내 질산성 질소가 90% 이상이 제거된 결과와 밀접한 관련이 있었다.

4. 결 론

본 연구는 부속액비를 주입한 돈방의 암모니아 저감 효과를 평가하고, 슬러리의 이화학적 특성과 미생물 군집을 분석하여 저감 요인을 규명하였다. 실험은 물을 이용한 대조구와 부속액비를 이용한 처리구로

구성하였다. 시험 기간 동안 암모니아 농도는 돈방 내부와 배기구에서 실시간으로 측정하였고, 배기구에서 측정된 암모니아 농도는 환기량을 반영하여 배출계수로 산정하였다. 연구 결과, 시험 기간 동안 처리구 돈방의 암모니아 농도는 대조구 대비 최대 33.3%, 암모니아 배출계수는 최대 26.2% 감소하였고, 이때 연간 암모니아 배출계수가 처리구에서 27.3% (대조구 1.1 kg/head·yr, 처리구 0.8 kg/head·yr) 감소하였다. 암모니아 저감 효과는 슬러리 내 암모니아성 질소 유래 자유 암모니아의 휘산 감소와 관련이 있었으며, 대조구 대비 처리구에서 최대 36.1% 감소하여 처리구 돈방의 암모니아 배출을 줄였다. 이는 처리구 슬러리에서는 다양한 미생물이 공존하여 특정 단백질 분해 미생물 (*S. alactolyticus*)이 우점되지 않아 암모니아성 질소 축적이 제한된 것에 기인하였다. 이 미생물의 비율은 대조구 대비 처리구에서 9% 감소하였으며, 이때 슬러리 내 암모니아성 질소 농도가 33.9% 낮아졌다. 결론적으로, 돈사 피트에 부숙액비를 주입하면 슬러리 내 미생물 활동에 따른 암모니아성 질소 축적이 방지되어 암모니아 배출을 저감할 수 있었다. 본 연구는 공기 중 암모니아, 슬러리의 이화학적 특성 및 미생물 군집을 종합적으로 분석하여 돈방 피트 내 부숙액비 주입에 따른 암모니아 저감 효과와 다각적 분석을 통한 저감 요인을 규명한 점에서 의미가 있다. 또한 축산시설의 연간 암모니아 배출계수가 27.3% 감소한다는 결과를 제시함으로써 대기오염물질 배출의 저감 대책 수립과 정책 이행을 위한 과학적 근거로 활용될 수 있는 의의를 가진다. 다만, 단기간 시험이라는 한계가 있어, 향후 순환수 주입 횟수를 증가한 장기간 운영을 통해 지속적인 효능을 검증하고 약취저감 효능을 유지하기 위한 부숙액비의 최적 주입 조건에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(RS-2022-RD010040, PJ017005)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Agriculture, fish and livestock news. (2025) How far has livestock manure treatment diversification come? Seoul, Republic of Korea. <https://www.aflnews.co.kr> (accessed on May 01, 2025).
- Becker, J., Eisenhauer, N., Scheu, S., Jousset, A. (2012) Increasing antagonistic interactions cause bacterial communities to collapse at high diversity, *Ecology Letters*, 15, 468-474. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01759>
- Brunekreef, B., Holgate, S.T. (2002) Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242.
- Chaudhary, H.J., Peng, G., Hu, M., He, Y., Yang, L., Luo, Y., Tan, Z. (2012) Genetic diversity of endophytic diazotrophs of the wild rice, *Oryza alata* and identification of the new diazotroph, *Acinetobacter oryzae* sp. nov, *Environmental Microbiology*, 63, 813-821. <https://doi.org/10.1007/s00248-011-9978-5>
- Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. (2008) Inhibition of anaerobic digestion process: A review, *Bioresource Technology*, 99(2008), 4044-4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Choi, Y., Ha, D.-M., Lee, S., Kim, D.-H. (2022) Effect of aerobically treated manure on odorous material emissions from a swine finishing barn equipped with a continuous pit recirculation system, *Animal Bioscience*, 35(2), 308-316. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0135>
- Clean Air Policy Support System (CAPSS) (2024) Emissions by sector. <http://www.air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30> (accessed on May 01, 2025).
- Dong, S., Li, M., Chen, Y. (2017) Inherent humic substance promotes microbial denitrification of landfill leachate via shifting bacterial community, improving enzyme activity and up-regulating gene, *Scientific Reports*, 7, 12215. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12565-3>
- Gao, X., Zhang, L., Liu, J., Zhang, Y., Peng, Y. (2024) First application of the novel anaerobic/aerobic/anoxic (AOA) process for advanced nutrient removal in a wastewater treatment plant, *Water Research*, 252(2024) 121234. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121234>
- Garcia-Gonzalez, M.C., Vanotti, M.B. (2015) Recovery of ammonia from swine manure using gas-permeable membranes: Effect of waste strength and pH, *Waste Management*, 38(2015), 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.021>
- Gumaelius, L., Magnusson, G., Pettersson, B., Dalhammar, G. (2001) *Comamonas denitrificans* sp. nov., an efficient denitrifying bacterium isolated from activated sludge,

- International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 51, 999-1006. <https://doi.org/10.1099/00207713-51-3-999>
- Ha, D. (2023) Basic principles and considerations for operating a liquid fertilizer recirculation system, Korean Pork Production Associations, Nov. 311-315. <https://www.koreapork.or.kr> (accessed on Oct. 11, 2024).
- Han, G.O., Kim, H.J., Han, G.U. (2021) A case study on piggyery farm scale liquid manure pit recharge system, Journal of Animal Environment Science, 23(2), 53-61. <https://doi.org/10.11109/JAES.2021.23.2.053>
- Højberg, O., Canibe, N., Poulsen, H.D., Hedemann, M.S., Jensen, B.B. (2005) Influence of dietary zinc oxide and copper sulfate on the gastrointestinal ecosystem in newly weaned piglets, Applied and Environmental Microbiology, 71(5), 2267-2277. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.5.2267.2277.2005>
- Hwang, O.H., Scoggin, K., Andersen, D., Ro, K., Trabue, S. (2021) Swine manure dilution with lagoon effluent impact on odor reduction and manure digestion, Journal of Environmental Quality, 50(2), 336-349. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20197>
- Hwang, O.H., Emmett, B., Andersen, D., Howe, A., Ro, K., Trabue, S. (2024) Effects of swine manure dilution with lagoon effluent of microbial communities and odor formation in pit recharge systems, Journal of Environmental Management, 358(120884). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120884>
- Jang, Y.N., Hwang, O.H., Jung, M-W., Ahn, B-K., Kim, H., Jo, G., Yun, Y.-M. (2021) Comprehensive analysis of microbial dynamics linked with the reduction of odorous compounds in a full-scale swine manure pit recharge system with recirculation of aerobically treated liquid fertilizer, Science of The Total Environment, 777 (146122). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146122>
- Jena, J., Kumar, R., Saifuddin, Md., Dixit, A., Das, T. (2016) Anoxic-aerobic SBR system for nitrate, phosphate and COD removal from high-strength wastewater and diversity study of microbial communities, Biochemical Engineering Journal, 105, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.09.007>
- Kim, Y., Oh, S. (2021) Machine-learning insights into nitrate-reducing communities in a full-scale municipal wastewater treatment plant, Journal of Environmental Management, 300, 2021, 113795. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113795>
- Korean port news. (2024) Spotlight on the Effects of Continuous Liquid Manure Circulation System: Improved Odor Reduction and Operational Efficiency. Seoul, Republic of Korea. <https://www.pignpork.com> (accessed on May 01, 2025).
- Kumari, P., Choi, H., Sudiarto, A. (2015) Assessment of bacterial community assembly patterns and processes in pig manure slurry, PLOS ONE, 10(9), e0139437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139437>
- Liu, M., Prakash, C., Nauta, A., Siezen, R.J., Franckeb, C. (2012) Computational analysis of cysteine and methionine metabolism and its regulation in dairy starter and related bacteria, Journal of Bacteriology, 194(13), 3522-3533. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.45A002>
- Livestock Environment Management Institute (LEMI) (2023) Improvement effects of facility support in the livestock odor reduction program - Final report on the research project, Sejong, Republic of Korea. <https://www.lemi.or.kr> (accessed on Oct. 01, 2024).
- Meng, X., Liu, B., Xi, C., Luo, X., Wang, X., Wang, X., Zhu, W., Wang, H., Cui, Z. (2018) Effect of pig manure on the chemical composition and microbial diversity during co-composting with spent mushroom substrate and rice husks, Bioresource Technology, 251, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.077>
- Midwest Plan Service (MWPS) (1983) MWPS-8 Swine housing and equipment handbook, Fourth Edition, 1983, Midwest Plan Service, Ames, Iowa, USA.
- Ministry of Government Legislation - National Law Information Center (MOLEG) (2011) Annex 8 (Emission Standards for Air Pollutants) of the Enforcement Rules of the Clean Air Conservation Act, pursuant to Articles 15 and 33. <https://www.law.go.kr> (accessed on May 01, 2025).
- Ministry of Government Legislation - National Law Information Center (MOLEG) (2020a) Annex 3 (Emission Standards and Ranges for Stricter Standards) of the Enforcement Rules of the Malodor Prevention Act, pursuant to Article 8(1). <https://www.law.go.kr> (accessed on May 01, 2025).
- Ministry of Government Legislation - National Law Information Center (MOLEG) (2020b) Annex 19 (Permissible Exposure Limits for Hazardous Agents) of the Enforcement Rules of the Occupational Safety and Health Act, pursuant to Article 145(1). <https://www.law.go.kr> (accessed on May 01, 2025).
- Ministry of Government Legislation - National Law Information Center (MOLEG) (2021) Annex 3-3 (Compliance Obligations for Livestock Business License Holders) of the Enforcement Rules of the Livestock Industry Act, pursuant to Article 30. <https://www.law.go.kr> (accessed on May 01, 2025).

- Ministry of Government Legislation - National Law Information Center (MOLEG) (2024) Water quality pollution process test standards. <https://www.law.go.kr> (accessed on Jan. 15, 2025).
- Ministry of Environment (MOE) (2023a) Standard design guide for livestock manure resource recycling facilities, Sejong, Republic of Korea. <https://www.me.or.kr> (accessed on Nov. 11, 2024).
- Ministry of Environment (MOE) (2023b) National Air Emission Inventory and Research Center, National Air Pollutant Emission Inventory Compilation Method Manual, Sejong, Republic of Korea. <https://www.air.go.kr> (accessed on Nov. 11, 2024).
- Ministry of Environment (MOE) (2024) The Second Comprehensive Plan for Fine Dust Management, Sejong, Republic of Korea. <https://www.me.or.kr> (accessed on May 01, 2025).
- National Institute of Animal Science (NIAS) (2021) Everything about liquid fertilizer circulation, Jeonju, Republic of Korea. <https://www.nias.go.kr> (accessed on Dec. 01, 2024).
- Nordgard, A.S.R., Bergland, W.H., Vadstein, O., Mironov, V., Bakke, R., Ostgaard, K., Bakke, I. (2017) Anaerobic digestion of pig manure supernatant at high ammonia concentrations characterized by high abundances of Methanosaeta and non-euryarchaeotal archaea, *Scientific Reports*, 7, 15077. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14527-1>
- Papadimitriou, K., Anastasiou, R., Mavrogonatou, E., Blom, J., Papandreou, N.C., Hamodrakas, S.J., Ferreira, S., Renault, P., Supply, P., Pot, B., Tsakalidou, E. (2014) Comparative genomics of the dairy isolate *Streptococcus macedonicus* ACA-DC 198 against related members of the *Streptococcus bovis*/*Streptococcus equinus* complex, *BMC Genomics*, 15(272), 1-21. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-272>
- Paredes, D., Kuschik, P., Mbwette, T.S.A., Stange, F., Muller, R.A., Koser, H. (2007) New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment - A review, *Engineering and Life Science*, 7(1), 13-25. <https://doi.org/10.1002/elsc.200620170>
- Patal, R.J., Nerurkar, A.S. (2024) *Thauera* sp. for efficient nitrate removal in continuous denitrifying moving bed biofilm reactor, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 47, 429-442. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-02977-7>
- Qu, Q., Zhang, K. (2021) Effects of pH, total solids, temperature and storage duration on gas emissions from slurry storage: A systematic review, *Atmosphere*, 12, 1156. <https://doi.org/10.3390/atmos12091156>
- Renard, J.J., Calidonna, S.E., Henley, M.V. (2004) Fate of ammonia in the atmosphere-a review of applicability to hazardous releases, *Journal of Hazardous Materials*, B108 (2004), 29-60. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.01.015>
- Reyes-Umana, V.M., Coates, J.D. (2023) A description of the genus *Denitromonas* nom. rev.: *Denitromonas iodatirespirans* sp. nov., a novel iodate-reducing bacterium, and two novel perchlorate-reducing bacteria, *Denitromonas halophila* and *Dinitromonas ohlonensis*, isolated from San Francisco Bay intertidal mudflats, *Environmental Microbiology*, 11(5), 1-14. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00915-23>
- SAS (2016) SAS Enterprise Guide version 9.2. SAS Insitute Inc. NC, USA.
- Serra-Toro, A., Abboud, Y.B.H., Cardete-Garcia, M.A., Astals, S., Valentino, F., Mas, F., Dosta, J. (2024) Ammonical nitrogen recovery from swine slurry using a gas-permeable membrane: pH control strategies and feed-to-trapping volume ratio, *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32193-5>
- Shade, A., Peter, H., Allison, S.D., Baho, D.L., Berga, M., Burgmann, H., Huber, D.H., Langenheder, S., Lennon, J.T., Martiny, J.B.H., Matulich, K.L., Schmidt, T.M., Handelsman, J. (2012) Fundamentals of microbial community resistance and resilience, *Frontier in Microbiology*, 3(417), 1-19. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00417>
- Sheng, Q.K., Yang, Z.J., Zhao, H.B., Wang, X.L., Guo, J.F. (2015) Effects of L-tryptophan, fructan, and casein on reducing ammonia, hydrogen sulfide, and skatole in fermented swine manure, *Asian Austrian Journal of Animal Science*, 28(8), 1202-1208. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0901>
- Strand, S.R. (2024) CRISPR/Cas9 genome editing by electrotransformation in *Denitrificimonas caeni* sp. Master's Thesis, Faculty of Chemistry, Biotechnology and Food Science, Norwegian University of Life Sciences, Norway.
- Tan, W., Jiang, Z., Chen, C., Yuan, Y., Gao, L., Wang, H., Cheng, J., Li, W., Wang, A. (2015) *Thiopseudomonas denitrificans* gen. nov., sp. nov., isolated from anaerobic activated sludge, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65, 225-229. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.064634-0>
- Wang, M., Zhang, X., Zhou, J., Yuan, Y., Dai, Y., Li, D., Li, Z., Liu, X., Yan, Z. (2017) The dynamic changes and international networks of prokaryotic community between co-

- digestion and mono-digestions of corn stalk and pig manure, *Bioresource Technology*, 225, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.008>
- Wang, X., Lu, X., Yang, G. (2014) Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition, *PLOS One*, 9(5), e97265. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097265>
- Wi, J., Lee, S., Kim, E., Lee, M., Koziel, J.A., Ahn, H. (2019) Evaluation of semi-continuous pig manure recharge system performance on mitigation of ammonia and hydrogen sulfide emissions from a swine finishing barn, *Atmosphere*, 10(170), 1-18. <https://doi.org/10.3390/atmos10040170>
- Wyer, K.E., Kelleghan, D.B., Blanes-Vidal, V., Schaubberger, G., Curran, T.P. (2022) Ammonia emissions from agriculture and their contribution to fine particulate matter: A review of implications for human health, *Journal of Environmental Management*, 323, 116285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116285>
- Yang, H.E., Zotti, C.A., McKinnon, J.J., McAllister, T.A. (2018) *Lactobacilli* are prominent members of the microbiota involved in the ruminal digestion of barley and corn, *Frontiers in Microbiology*, 9(718), 1-17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00718>
- Yao, R., Yuan, Q., Wang, K. (2020) Enrichment of denitrifying bacterial community using nitrite as an electron acceptor for nitrogen removal from wastewater, *Water*, 12(48), 1-12. <https://doi.org/10.3390/w12010048>

Authors Information

- 황옥화 (농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과 연구사)
(hoh1027@korea.kr)
- 이준엽 (농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과 연구관)
(andrewlee@korea.kr)
- 박준수 (농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과 연구사)
(karmon2@korea.kr)