

논문

돼지에 벤조산 첨가사료 급여에 따른 돈방 암모니아 저감 효과 및 검증

Effect of Benzoic Acid-Supplemented Diets on Ammonia Emission Reduction its Determinants in Pig Barn

황옥화*, 이해민, 위지수, 박준수

농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과

Okhwa Hwang*, Hyemin Lee, Jisoo Wi, Junsu Park

Rural Development Administration, National Institute of Animal Science,
Smart Livestock Environment Division, Wanju 55365, Republic of Korea

접수일 2025년 10월 23일
수정일 2025년 11월 9일
채택일 2025년 11월 23일

Received 23 October 2025
Revised 9 November 2025
Accepted 23 November 2025

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

Abstract Ammonia is an air pollutant that affects both ambient air quality and worker health, and has recently been identified as a precursor to the formation of fine particulate matter (PM_{2.5}). Accordingly, the livestock sector is increasingly required to develop technologies to mitigate ammonia emissions. This study evaluated the effect of benzoic acid-supplemented diets on reducing ammonia emissions from pig barn and quantified the total free ammonia emissions (potential emissions) based on slurry composition, thereby establishing a causal relationship for ammonia mitigation. Ammonia concentrations were measured in real-time both inside the pig barn and at the exhaust outlets, and the annual ammonia emission factor was calculated by incorporating ventilation rates and number of pigs. And, slurry samples were collected weekly and analyzed for key chemical parameters such as pH, electrical conductivity, ammonium nitrogen concentration etc. The results showed that the annual ammonia emission factor was represented a 54.5% reduction upon feeding with benzoic acid-supplemented diets (0.5 kg/head-year) compared to control (1.1 kg/head-year). In addition, the both pH and ammonium nitrogen concentrations in the slurry were significantly lower in the treatment, with the ammonium nitrogen concentration decreasing by an average of 34.0%. Furthermore, the estimated total free ammonia emissions, calculated based on slurry pH and ammonium nitrogen concentration, showed a trend similar to the actual measured emissions at the exhaust fan. On an 8-week average basis, the total free ammonia emissions was reduced by 66.1%, and the actual emission by 58.8% in the treatment. These results demonstrate that the benzoic acid-supplemented diets fundamentally reduces the volatilization potential of ammonia by altering the chemical composition of the slurry. This study provides field-based evidence of the effectiveness of feed additive-based ammonia mitigation strategies and quantitatively estimates the potential ammonia emissions to elucidate the causal relationship underlying the mitigation effect.

Key words: Ammonia, Ammonium nitrogen, Benzoic acid, pH, Total free ammonia emissions

1. 서론

2025년 OECD/FAO 농업전망에 따르면, 축산물 소비량은 2021~24년 40 kg/capita/year에서 2034년 45 kg/capita/year으로 증가할 것으로 예측하였다(OECD-FAO, 2025). 이 중 돼지고기가 전체 축산물의 50% 이

상을 차지하며, 이는 돼지 사육두수의 지속적인 증가로 이어진다. 현재 국내 돼지 사육두수는 연평균 1.5%씩 증가하고 있으며, 2032년까지 꾸준한 상승세를 이어갈 것으로 언급하였다(KREI, 2024). 돼지 사육두수의 증가는 악취와 분뇨처리에 대한 환경적 부담을 가중시켰으며, 2023년 축산 악취민원(15,701건)

이 총 악취민원(39,457건)의 60.2%를 차지하였다(KEC, 2024). 악취물질 중 하나인 암모니아는 황산화물(SO₂), 질소산화물(NO₂) 등의 가스상 물질과 반응하여 초미세먼지(PM_{2.5})를 생성하는 전구물질로 최근 이슈화되었다. 2021년 기준, 농업부문 암모니아 배출량(76.5%)에서 축산부문(분뇨관리)이 90.6%이었고, 이 중 돼지가 44.0%로 가장 높은 비율을 차지하였다(CAPSS, 2024; Wyer *et al.*, 2022). 축산시설의 암모니아 배출 허용기준은 대기환경보전법에서 30 ppm(그 밖의 배출시설)과 악취방지법에서 1 ppm 이하(기타지역)로 규정하고 있다(MOLEG, 2020a, 2011). 산업안전보건법에서는 작업자의 암모니아 노출 허용기준을 평균 25 ppm(1일 8시간 작업 시)으로 제한하고 있으며(MOLEG, 2020b), 암모니아는 대기 질과 작업자 건강에 영향을 주는 오염물질로써 체계적 관리가 필요하다.

돼지사육 농가는 암모니아 발생을 줄이기 위해 사료첨가제, 돈사 내·외부에 저감시설, 농장 주변에 방풍림/방풍벽 등을 활용한다. 이 중 사료첨가제는 “사료 등의 기준 및 규격”에 따른 보조사료의 범위 고시에서 관리되고 있으며, 대부분의 농가에서는 사료첨가제를 기본적인 악취저감 수단으로 이용하고 추가적으로 다른 기술적 방법을 병행한다(MOLEG, 2025). 사료첨가제는 사료 내 영양소의 소화를 촉진하여 체내 흡수율을 높이고, 분뇨로 배설되는 양을 줄이는 역할을 한다. 특히 영양소 중 질소 성분은 암모니아 발생의 주요 물질로써, 돼지가 섭취한 사료 내 질소(100%)의 약 70%가 분뇨로 배설된다(Mahur *et al.*, 2025; Aarnink, 1997). 이러한 질소 배설을 저감하기 위해 효소제, 유기산제, 미생물제 등 다양한 계열의 사료첨가제가 활용되고 있다. 사료첨가제 산업은 수요 증가에 힘입어 지속적으로 성장하고 있으며, 2025년 사료첨가제 시장 규모는 39.8억 달러에서 2032년 53.7억 달러로 4.4% 증가할 것으로 전망하였다. 또한 전 세계의 1.7%를 차지하고 있는 한국의 사료첨가제 시장도 2030년에는 약 930.6 백만 달러 규모로 성장할 것이다. 특히 돼지 사료첨가제는 전체

축종의 26.3%를 차지하며, 2030년 14,537.3 백만 달러 규모의 시장성을 확보할 것으로 보도하였다(FBI, 2025; HGVR, 2025). 현재 돼지 사료첨가제로 이용되는 효소제와 미생물제는 주로 영양소의 체내 흡수율을 높이는 기능을 가지고 있으며, 유기산제는 영양소의 체내 흡수율뿐만 아니라 장내 효소 활성화와 유익 미생물의 활동을 촉진하는 기능도 있다(Mahur *et al.*, 2025). “사료 등의 기준 및 규격”에 따른 보조사료의 범위 고시에서 유기산제(산미제)는 젖산, 초산, 푸말산, 안식향산 등 21종이 있다. 이 중 안식향산은 영어로 벤조산(Benzoic acid)이라고 하며, 미국(21 CFR Ch. I §573.210)과 유럽(EC No 1831/2003)에서도 돼지 사료첨가제로 활용할 수 있도록 규정하였다(OJEU, 2024; USGI, 2014).

벤조산은 일반적인 유기산제와 달리 독특한 생리작용을 통해 질소 배설과 암모니아 휘산을 저감시키는 기능을 가진다. 일반적으로 질소 성분으로 구성된 사료 내 단백질은 위장에서 아미노산으로 분해된 뒤 요소회로를 거쳐 뇨 중 요소(Urea)로 배설되며, 이후 분 중 우레아제(Urease)와 반응하여 암모늄(Ammonium, NH₄-N)을 생성한다(Cortus, 2006). 이때 벤조산은 아미노산 중 글리신(Glycine)과 결합해 히푸르산(Hippuric acid)으로 배설됨으로써 뇨를 통한 요소 배설을 줄이고(Murphy *et al.*, 2011; Buhler *et al.*, 2006), 결과적으로 암모늄 생성과 암모니아 휘산을 함께 감소시킨다. 또한 요소 대신 배설된 히푸르산은 분뇨 pH를 낮추어 암모니아 기화 가능성을 더욱 억제한다. 그동안 벤조산 첨가사로 급여효과에 대한 연구는 주로 증체량, 사료효율, 육질 등과 같은 경제형질이나 면역, 장내균총 등 질병예방 측면에 초점을 맞추어 수행되어 왔다(Choi and Kim, 2024). 반면, 악취나 암모니아 저감에 관한 연구는 부가적으로 다루고 있었는데, 대사 또는 사양시험에서 채취한 분뇨를 대상으로 잠재 악취물질을 분석하여 간접적인 저감 효과를 검증하였다. 또는 현장 규모 시험에서 채취한 분뇨를 실험실 규모의 챔버에 투입한 후 인위적인 공기 주입으로 휘산되는 암모니아 농도를 측정하는 방

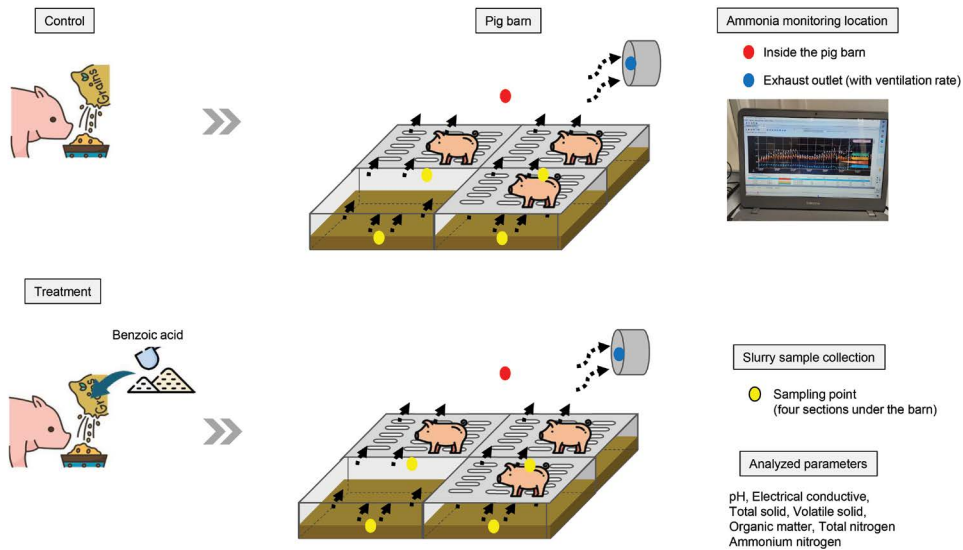


Fig. 1. Experimental design.

식에 머물러 있거나, 시험 전과 후 또는 주 1회 암모니아 농도를 분석하여 단순 비교하는 수준에 그쳤다 (Kim *et al.*, 2025; Humphrey *et al.*, 2022; Eriksen *et al.*, 2014). 여기서 실험실 규모 챔버를 이용하면 온도, 풍속 등 환경변수를 정밀하게 조절할 수 있는 장점이 있지만 실제 돈방의 환기, 온도, 공기 흐름 등의 동적 환경요인을 충분히 반영하지 못한다. 따라서 챔버를 통해 도출된 암모니아 휘산율이나 저감 효율이 현장 배출 특성을 과대 혹은 과소평가할 가능성이 있다. 이에 실제 사육환경에서 암모니아 농도를 연속 측정하는 것이 실제 배출 변동을 반영한 결과를 도출할 수 있다(Cao *et al.*, 2021; Argo *et al.*, 2014).

따라서 본 연구는 벤조산 첨가사료 급여에 따른 환경적 효과를 실증적으로 규명하는 것을 핵심 목표로 하여, 첫째, 분뇨에서 인위적으로 휘산시킨 암모니아가 아닌 실제 돈방 내부와 배기구에서 실시간 암모니아 농도를 측정하였다. 둘째, 암모니아 농도는 일일 100회 연속 측정 데이터를 활용하여 일평균 변동성과 암모니아 배출계수를 산정하였다. 셋째, 돈방 피트 내 슬러리의 성분으로 산출한 자유 암모니아 총 배출량과 실제 대기 중 암모니아 배출량 간의 상관관계를

분석함으로써, 벤조산 첨가사료 급여에 따른 분뇨 내 질소 전환이 암모니아 배출을 저감할 수 있는지를 과학적으로 규명하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 벤조산 2%가 첨가된 사료를 급여시킨 돼지 사육돈방의 암모니아 저감 효과를 평가한 것이다. 전체적인 시험 과정은 그림 1과 같으며, 대조구는 일반 배합사료, 처리구는 벤조산 첨가사료를 각각 급여시켰고, 돈방 내부와 배기구에서 암모니아 농도를 실시간으로 측정하여 암모니아 저감 효과를 평가하였다. 그리고 주 1회에 피트 내 슬러리를 채취하여 성분을 분석하였다. 상세한 연구 방법은 다음 단락에서 서술하였다.

2.1 시험돈사 및 시험축

시험돈사는 강제 환기식 밀폐형 구조로, 내부 돈방은 4개의 팬으로 구획되었다. 돈방의 환기방식은 복도 내부의 공기가 측면 입기구(직사각형, 0.4 m × 0.2

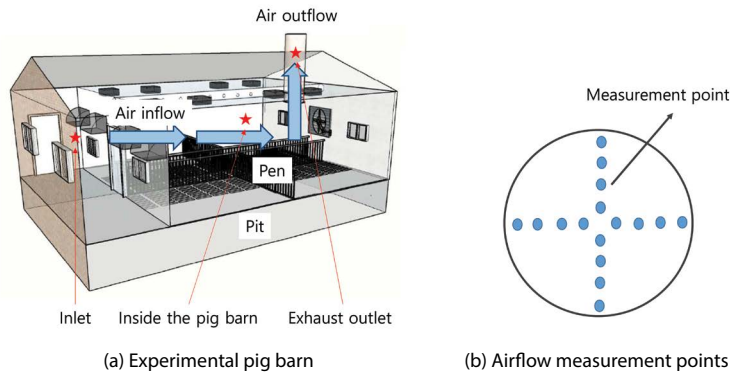


Fig. 2. Experimental pig barn and airflow measurement points.

m)를 통해서 유입되면, 돈방 내부 천장에 설치된 굴뚝 배기구(Φ 500)로 배출된다(그림 2a). 대조구와 처리구는 별도의 돈방에서 개시 체중 30 kg 돼지를 각각 48두씩 배치하였고, 대조구와 처리구의 돈방 구조와 환기 방식은 동일하였다. 시험 사료로 대조구는 일반 배합사료, 처리구는 벤조산 2%가 첨가된 사료를 자유채식시켰다. 시험기간은 돼지 출하 체중(100 kg) 도달 시까지 57일(약 8주) 동안 수행하였다.

2.2 암모니아 농도, 배기구 환기량 및 돈방 내부 온도 측정

암모니아(Ammonia, NH₃) 농도는 Multisampler (INNOVA 1409)가 장착된 Photoacoustic spectrometer (INNOVA 1512, Lumasense Technologies, Denmark, Detection limit 0.2 ppm)를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 측정 지점은 돈방 내부로 공기가 유입되는 복도에 유입구(Inlet), 돈방 내부의 작업자 코 높이의 중앙지점(Inside the pig barn), 그리고 돈방 배기구의 중앙(Exhaust outlet)으로 설정하였다(그림 2a). 암모니아 농도는 1시간 간격으로, 일일 약 100회 측정하였으며, 측정 장비는 시료 1개당 측정 시간이 총 66초(가스 흡입 5초, 측정 50초, 플러싱 11초)이고 최소 1 ppm 이하의 암모니아 농도를 확인할 수 있다. 측정 장비는 사용 전에 암모니아 표준 가스(50 ppm, Rigas, Republic of Korea)를 질소 가스(Daedeck gas,

99.999%, Republic of Korea)로 희석하여 준비한 총 7개 농도의 암모니아 표준가스(0, 5, 10, 20, 25, 30, 50 ppm)를 사용하여 교정과 검량선을 작성하였다. 돈방 배기구의 환기량은 배인형 풍속계(Model 435, Testo, USA)를 이용하여 배기구 내부의 10개 지점에서 풍속을 측정 후, 평균값을 구하고 이를 배기구 단면적과 곱하여 산출하였다(그림 2b). 그 결과, 시험 1일에서 18일까지 대조구 돈방의 환기량은 1220 ± 91 m³/h, 처리구 돈방은 1244 ± 33 m³/h로 처리구 간에 유의적 차이가 없었고(P < 0.05), 18일 이후 환기량은 대조구 돈방 3524 ± 76 m³/h, 처리구 돈방 3462 ± 173 m³/h로, 이 또한 처리구 간에 유의적 차이가 없었다(P < 0.05). 돈방 배기구에서 측정된 암모니아 농도와 환기량은 아래의 산식에 따라 암모니아 배출량(Ammonia emission rate, g/h) 계산에 이용하였다(1).

$$(OA-IA) \times \frac{17.03}{24.45} \times \frac{273.16}{(273.16+T)} \times \frac{VR}{1000} \quad (1)$$

여기서, OA와 IA는 각각 돈방 배기구(OA)와 복도 유입구(IA)에서 측정된 암모니아 농도(ppm), 17.03은 암모니아 분자량(g/mol), 24.45는 25°C 기준 1 mol의 기체 부피(L/mol), 273.16은 절대온도 변환 상수(K), T는 측정온도(20°C), VR은 환기량(m³/h)이다. 그리고 암모니아 배출량은 사육두수를 반영하여 연간 암모니아 배출계수(Ammonia emission rate per year,

kg/head-yr)를 산출하였다(2).

$$\frac{AE \times 24 \times 365}{PH \times 1000} \quad (2)$$

여기서 AE는 암모니아 배출량(g/h), PH는 사육두수(Pig head), 나머지 상수는 단위 환산을 위해 사용하였다. 돈방 내부 온도는 실시간 측정장비(ICT SMC-350 Auto, 측정 범위 0~50°C, Jiwon, Republic of Korea)를 활용하여 측정하였다. 그 결과, 시험 1일에서 18일까지 대조구 25.0±1.4°C, 처리구 24.7±1.7°C, 18일 이후 대조구 25.3±2.3°C, 처리구 24.5±2.5°C로 시험기간 동안 처리구 간에 유의적 차이가 없었다(P<0.05).

2.3 슬러리 성분

분석용 슬러리는 돈방 내부 피트를 4구획으로 구분하여, 각 구획당 6개 지점에서 주 1회 채취한 후 혼합하였다. 즉, 1회 채취 시마다 처리구별로 총 4점의 슬러리 시료를 분석하였다. 슬러리 성분은 수질오염 공정시험 기준(MOLEG, 2024)에 준하여 pH, 전기전도도(Electrical conductivity, EC; ES 04310.1c), 총고형물(Total solid, TS; ES 04851.1), 휘발성 고형물(Volatile solid, VS; ES 04852.1), 유기물(Organic matter, OM; ES 04852.1), 총질소(Total nitrogen, TN; ES 04363.1a), 암모늄 질소(Ammonium nitrogen, NH₄-N; ES 04355.1c)를 분석하였다. pH는 공기 중 암모니아와 슬러리의 암모늄(Ammonium, NH₄⁺)의 평형에 영향을 주는 주요 인자로, pH가 높으면 암모니아 휘산이 증가한다. 전기전도도는 슬러리 내 암모늄 농도를 간접적으로 추정할 수 있으며, 양이온인 암모늄 농도가 높으면 전기전도도가 높아진다. 그리고 총질소와 암모늄 질소는 공기 중 암모니아 휘산과 직접적 관련이 있는 지표이다(Serra-Toro *et al.*, 2024; Qu and Zhang, 2021; Garcia-Gonzalez and Vanotti, 2015). 각 성분의 분석 방법을 정리하면, pH와 전기전도도는 각 프로브가 장착된 분석 장비(Model 850C, Schott, Germany)를 이용하여 측정하였다. pH 프로브의 측정 범

위는 pH -2.000~pH +19.999, 정밀도 pH ±0.005이고, 전기전도도 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. 휘발성 고형물과 유기물은 자기 도가니에 슬러리를 넣고 110°C에서 24시간 건조하고, 다시 550°C에서 2시간 건조한 후 건조 전과 후의 무게를 측정하였다. 휘발성 고형물의 결과는 총고형물 중 휘발성 고형물의 비율로 정리하였다. 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(Hydrochloric acid, HCl) 용액과 혼합한 뒤 UV spectrometer (220 nm)로 흡광도를 측정하였다. 암모늄 질소는 슬러리에 산화마그네슘(Magnesium oxide, MgO)을 첨가한 시료를 킬달 장치(Vapodest 50s, Gerhardt GmbH, Germany)를 이용하여 분석하였다. 킬달 장치는 용해 시간 2~4분, 회수율 99.5% 이상, 재현성 ±1 및 검출한계 0.1 mg-N의 사양을 갖추었다.

2.4 자유 암모니아 총 배출량 및 통계분석

자유 암모니아(Free ammonia, mg/L)는 슬러리에서 공기 중으로 휘산될 가능성을 가진 암모니아의 잠재적 공급량으로, 슬러리 pH와 총 암모니아성 질소(Total ammoniacal nitrogen, TAN) 농도로 계산한다(Liu *et al.*, 2019). 만약 슬러리 pH 7 이하일 경우, 총 암모니아성 질소 대신 암모늄 질소 이용이 가능하다(Li *et al.*, 2012). 자유 암모니아 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{1.214 \times AN \times 10^{pH}}{e^{6344/(273+T)} + 10^{pH}} \quad (3)$$

여기서 AN은 슬러리 내 암모늄 질소 농도(mg/L), pH는 슬러리 pH, T는 측정온도(20°C)이다(Liu *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2012). 그리고 자유 암모니아는 슬러리

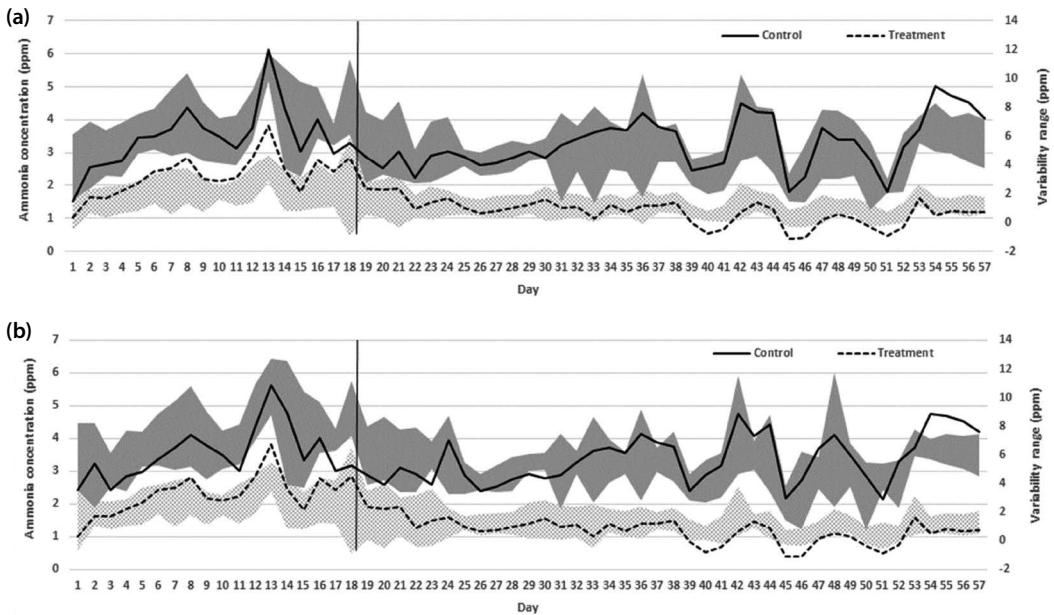


Fig. 3. Median and variability range of ammonia concentration inside the pig barn (a) and at the exhaust outlet (b).

표면적과 피트 내부의 질량전달계수를 이용하여 자유 암모니아 총 배출량(Total free ammonia emission, g/h)을 계산하였다(Montes *et al.*, 2009; Arogo *et al.*, 1999).

$$((FA \times H \times 1000) - AN_{\text{ambient}}) \times K_{OL} \times A \times \frac{3600}{1000} \quad (4)$$

여기서 FA는 자유 암모니아(mg/L), H는 헨리상수(0.79), AN_{ambient}는 대기 중 암모니아 농도(2.59 mg/m³), K_{OL}은 피트 내부의 질량전달계수(5.91 × 10⁻⁶ m/s), A는 슬러리 표면적(44.66 m²)이다. 나머지 상수는 단위 환산을 위해 사용하였다. 통계분석은 대조구와 처리구의 분석 결과 간에 유의적 차이를 분석하기 위해 엑셀(Microsoft Excel 2016 version)을 이용하여 F Test와 T Test를 수행하였고, SAS version 9.2(SAS, 2016)를 이용한 일반선형모델(General linear model)로 추가 분석을 실시하였다. 통계적 유의성은 95% 신뢰수준(P < 0.05)을 확인하여 판단하였다. 그리고 계산된 자유 암모니아 총 배출량과 실제 돈방에서 측정된 암모니아 배출량 간의 정량적 관계를 분석하기 위

해 스피어만(Spearman) 순위상관계수(ρ)와 비선형 회귀모델을 적용한 결정계수(R²)를 산정하였다. 암모니아 휘산은 환경요인 외에도 기체-액체 평형, 질량전달저항 등 복합적 변수에 영향을 받기에 비선형 상관성이 나타날 가능성이 높다고 한다(Sommer *et al.*, 2022; Hafner *et al.*, 2019). 이에 본 연구는 참고문헌을 근거하여 상관성 분석을 실시하였으며, 통계적 유의성 95% 신뢰수준(P < 0.05)을 검정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 암모니아 저감 효과

암모니아 농도는 그림 3에서 돈방 내부 (a)와 배기구 (b)를 구분하여 정리하였으며, 처리구별로 암모니아 농도의 일일 중앙값(실선)과 암모니아 농도의 변동성(면적)을 그래프로 나타내었다. 시험 18일에 표시한 실선은 환기량의 변화를 나타낸 것이다. 시험 1일차와 57일차 돈방 내부의 암모니아 농도는 대조구가 1.5 ppm에서 4.0 ppm, 처리구가 1.0 ppm에서 1.2

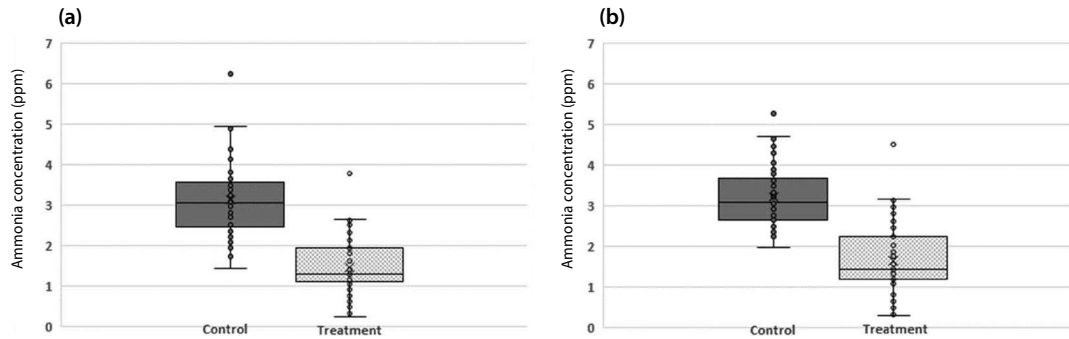


Fig. 4. Boxplot of average ammonia concentration inside the pig barn (a) and at the exhaust outlet (b).

ppm로, 대조구에 비해 처리구에서 적게 증가하였다. 배기구의 암모니아 농도도 처리구에서 더 적게 증가하였다(대조구 2.4 ppm에서 4.2 ppm, 처리구 1.5 ppm에서 1.4 ppm). 시험기간 동안 대조구와 처리구의 암모니아 농도에 대한 일일 중앙값을 T test와 일반선형 모델(SAS)을 이용한 통계분석을 실시하여 95% 신뢰 수준에 따른 유의성을 확인한 결과, $P=0.005$ 로 처리구가 대조구 대비 유의적으로 낮았다. 돈방 내부의 암모니아 농도는 53.7% (대조구 3.4 ± 0.8 ppm, 처리구 1.8 ± 0.9 ppm), 배기구의 암모니아 농도는 47.8% (대조구 3.3 ± 0.8 ppm, 처리구 1.5 ± 0.7 ppm)가 대조구에 비해 처리구에서 감소하였다. 그리고 암모니아 농도 중앙값의 변동성은 평균적으로 돈방 내부에서 대조구 3.3 ± 0.8 ppm, 처리구 1.5 ± 0.7 ppm, 배기구에서 대조구 3.4 ± 0.8 ppm, 처리구 1.5 ± 0.7 ppm로, 대조구에 비해 처리구에서 암모니아 농도의 변동성이 약 50% 낮았다. 정리하면, 대조구는 암모니아 농도의 변동성이 크고 주기적으로 피크가 나타난 반면, 처리구는 초반 일부 구간을 제외하고 안정적인 농도 분포를 보였다. 대조구와 처리구의 돈방 구조, 환기량, 온도, 사육두수 등이 유사한 점을 고려하면, 이러한 차이는 환경적 요인보다 벤조산 첨가사료 급여에 따른 슬러리 내 화학적 변화에 기인한 것으로 판단된다. 돼지에 벤조산 첨가사료를 급여하면 분뇨 내 pH가 낮아지고, 요소 분해에 따른 암모늄 생성이 저해된다 (Murphy *et al.*, 2011; Buhler *et al.*, 2006; Cortus,

2006). 이 기작은 pH 완충작용으로 인해 암모니아/암모늄 평형을 암모늄 쪽으로 이동시키고, 추가적으로 암모늄 생성이 저감되어 암모니아 휘산이 감소한 것이다. 뿐만 아니라 처리구 슬러리의 이러한 화학적 반응이 장기간 지속되면서 암모니아 농도의 변동성을 함께 낮추게 된 것이다 (Liu *et al.*, 2023; Fangueiro *et al.*, 2015).

그림 4는 처리구별로 암모니아 농도의 일일 평균값을 박스플롯으로 도식화하였다. T test와 일반선형 모델(SAS)을 이용하여 대조구와 처리구의 암모니아 농도 일일 평균값에 대한 통계분석을 실시한 결과, 처리구 간에 95% 신뢰 수준의 통계적 유의적 차이를 보였다 ($P=0.0018$). 암모니아 농도는 대조구에 비해 처리구에서 돈방 내부는 53.5% (대조구 3.1 ± 0.8 ppm, 처리구 1.5 ± 0.7 ppm; 그림 4a), 배기구는 48.3% (대조구 3.2 ± 0.7 ppm, 처리구 1.7 ± 0.8 ppm; 그림 4b) 감소하였다. 그리고 처리구별 박스플롯 형태를 보면 처리구는 대조구에 비해 박스 길이인 사분위 범위 (Interquartile range, IQR)가 좁고, 돈방 내부와 배기구 모두에서 처리구의 암모니아 농도가 유의하게 낮은 경향을 보였다 ($P < 0.05$). 이 결과는 그림 3의 암모니아 일일 변동성과 일관된 양상이며, 벤조산 첨가사료 급여에 따른 슬러리 내 화학적 성분에 의한 것으로 판단된다. 이는 처리구 돈방 배출 공기 중 암모니아의 농도 분포가 대조구에 비해 대체적으로 낮은 값에 집중됨으로써 암모니아 감소 효과가 나타난 것이다. 슬

러리 내 화학적 성분 결과는 3.2 슬러리 성분 변화에서 자세하게 다루었다.

벤조산 첨가사료 급여에 따른 암모니아 저감 효과는 여러 선행연구에서 보고되었다. Eriksen *et al.* (2014)은 벤조산 1% 첨가사료를 급여한 돼지의 분뇨를 채취하여 25 L 반응기에 주입한 후 배출 공기 중 암모니아 농도를 측정된 결과, 대조구(240 mg $\text{NH}_3\text{-N}/\text{m}^2/\text{h}$)에 비해 처리구(125 mg $\text{NH}_3\text{-N}/\text{m}^2/\text{h}$)가 48% 감소하였다. 또 다른 연구에서는 벤조산 0.3% 첨가사료를 급여한 돼지 분뇨를 1.3 L 반응기에 담아 5일간 배양한 결과, 배출 공기 중 암모니아 휘산이 30% (대조구 49.9 g/m²/d, 처리구 34.9 g/m²/d) 감소하였다(Humphrey *et al.*, 2022). 최근 Kim *et al.* (2025)은 기존의 분뇨 반응기 시험과 달리, 환경조절 챔버에서 사육 중인 돼지 8두에 벤조산 1% 첨가사료를 급여하면서 24시간 동안 배출 공기 중의 암모니아 농도를 측정하였다. 그 결과, 대조구(2.87 ppm)에 비해 처리구(1.10 ppm)의 암모니아 농도가 61% 감소하였다. 이처럼 선행연구들은 돼지에 벤조산 첨가사료를 급여한 후 채취한 분뇨에 인위적으로 공기를 주입하거나, 24시간 이내의 단기간 암모니아 농도를 측정하였다. 따라서, 본 연구와는 측정 조건에 차이가 있어 감소율의 절대적 비교는 어렵다. 다만, 선행연구들의 결과와 일관된 경향을 보였으며, 본 연구에서 관찰된 벤조산 첨가사료의 암모니아 저감 효과의 타당성을 뒷받침하였다.

그러나 선행연구와 달리, 본 연구에서는 배기구의 암모니아 농도를 환기량과 사육두수에 기반하여 연간 돼지 두당 암모니아 배출계수를 산출하였다. 그 결과, 대조구는 1.1±0.2 kg/head-yr, 처리구는 0.5±0.2 kg/head-yr로, 처리구에서 54.5%의 암모니아 배출계수가 감소하였다. 특히 대조구의 암모니아 배출계수는 국내 육성·비육돈 돈사의 국가 통계값(1.1 kg/head-yr)과 일치하여, 본 실험의 대표성을 뒷받침하였다(MOE, 2023). 암모니아 분석 결과를 요약하면, 벤조산 첨가사료 급여를 통해 돈방에서 배출되는 암모니아 농도가 47.8~53.7% 감소하였으며, 연간 배출

계수도 54.5% 저감되는 효과가 나타났다. 또한 암모니아 농도의 일일 변동 폭이 감소하여, 벤조산 첨가사료의 급여가 돈사 유래 암모니아 배출을 안정적이고 지속적으로 제어할 수 있는 효과적인 수단임을 확인하였다.

3.2 슬러리 성분 변화

슬러리는 시험기간 동안 주 1회 채취하여 pH, 전기전도도, 총고형물 등 총 7개 항목을 분석하였으며, 그 결과를 표 1에 제시하였다. 이 중 암모니아 휘산과 직접적으로 관련된 pH와 암모늄 질소 농도는 시간 경과에 따른 변화를 시각적으로 표현하기 위해 그래프로 나타내었다(그림 5).

시험기간 동안 전기전도도와 암모늄 질소 농도가 처리구 간에 유의적 차이를 보였으며, pH는 시험 중반 이후부터 유의적 차이가 나타났다($P < 0.05$). 그림 5에서 처리구별 pH 변화를 살펴보면, 시험 1주차 대비 8주차 시점에서 대조구는 pH 6.86에서 pH 6.58로 0.28 감소하였고, 처리구는 pH 6.98에서 pH 6.13으로 0.85 감소하였다. 이에 따라 시험 8주차 pH는 처리구가 대조구보다 0.45 낮았다. 처리구에서 더 큰 폭의 pH 감소가 관찰된 것은 벤조산의 작용 원리와 관련이 있다. 일반적으로 사료 내 단백질은 위장에서 소화와 흡수된 후에 질소 성분이 간으로 이동하여 암모니아(NH_3) 형태로 전환되고(아미노산 + NAD^+ + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{NADH} + \text{H}^+$), 이후 요소회로를 거쳐 요소(NH_2CONH_2)로 합성된 후 뇨로 배설된다($2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 3\text{ATP} \rightarrow \text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O} + 3\text{ADP} + 3\text{Pi}$; Cortus, 2006). 그러나 벤조산이 첨가된 사료를 섭취하면, 벤조산($\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$)은 소장에서 흡수되어 간으로 이동한 후 글리신($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)과 결합하여 히푸르산($\text{C}_6\text{H}_5\text{CONHCH}_2\text{COOH}$)으로 전환된 뒤 뇨로 배설된다($\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH} + \text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + \text{glycine N-acyltransferase} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{CONHCH}_2\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}$). 히푸르산은 유기산의 일종으로, 슬러리 pH를 저하시키는 역할을 한다(Murphy *et al.*, 2011; Buhler *et al.*, 2006). Eriksen *et al.* (2014)은 벤조

Table 1. Slurry compositions.

| | Weeks | pH | EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | TS (%) | VS (%) | OM (%) | TN (mg/L) | NH ₄ -N (mg/L) |
|-----------|-------|------|--------------------------------|--------|--------|--------|-----------|---------------------------|
| Control | 1 | 6.86 | 7185 | 1.4 | 71.5 | 1.0 | 1464.0 | 994.7 |
| | 2 | 6.77 | 8118 | 1.6 | 70.0 | 1.1 | 1578.4 | 1088.2 |
| | 3 | 6.64 | 8645 | 2.4 | 79.5 | 1.9 | 2725.8 | 1465.7 |
| | 4 | 6.53 | 9380 | 3.1 | 80.0 | 2.5 | 3422.4 | 1568.6 |
| | 5 | 6.59 | 11523 | 4.0 | 76.2 | 3.1 | 4279.6 | 2055.2 |
| | 6 | 6.63 | 11915 | 4.2 | 78.2 | 3.3 | 4944.0 | 1913.5 |
| | 7 | 6.68 | 12503 | 4.8 | 79.0 | 3.8 | 5043.5 | 2464.9 |
| | 8 | 6.58 | 12390 | 6.5 | 80.1 | 5.2 | 5134.4 | 2833.6 |
| Treatment | 1 | 6.98 | 4675 | 0.7 | 69.1 | 0.5 | 1036.5 | 576.5 |
| | 2 | 6.54 | 7545 | 1.4 | 72.1 | 1.0 | 1364.5 | 755.6 |
| | 3 | 6.45 | 7628 | 1.7 | 76.9 | 1.4 | 2186.1 | 914.6 |
| | 4 | 6.34 | 7858 | 3.4 | 81.8 | 2.8 | 3203.7 | 1077.8 |
| | 5 | 6.21 | 9003 | 4.0 | 83.2 | 3.4 | 4331.9 | 1164.6 |
| | 6 | 6.09 | 9710 | 4.3 | 83.3 | 3.6 | 4947.0 | 1304.5 |
| | 7 | 6.16 | 10250 | 5.1 | 84.1 | 4.3 | 4890.5 | 1770.8 |
| | 8 | 6.13 | 10828 | 5.9 | 84.7 | 5.0 | 4418.5 | 1922.1 |
| P value | 1 | 0.37 | 0.01 | 0.04 | 0.48 | 0.05 | 0.01 | 0.01 |
| | 2 | 0.07 | 0.00 | 0.54 | 0.54 | 0.75 | 0.16 | 0.09 |
| | 3 | 0.05 | 0.00 | 0.21 | 0.40 | 0.23 | 0.05 | 0.00 |
| | 4 | 0.25 | 0.00 | 0.77 | 0.43 | 0.72 | 0.24 | 0.00 |
| | 5 | 0.11 | 0.00 | 0.98 | 0.05 | 0.78 | 0.91 | 0.02 |
| | 6 | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.00 | 0.17 | 0.99 | 0.01 |
| | 7 | 0.03 | 0.00 | 0.52 | 0.00 | 0.28 | 0.27 | 0.01 |
| | 8 | 0.01 | 0.03 | 0.49 | 0.00 | 0.80 | 0.04 | 0.01 |

EC, Electrical conductivity; TS, Total solid; VS, Volatile solid; OM, Organic matter; TN, Total nitrogen; NH₄-N, Ammonium nitrogen

산 1% 첨가사료를 급여한 돼지 분뇨의 pH가 대조구 (pH 8.4)보다 처리구 (pH 8.0)에서 0.4가 낮았으며, 처리구 분뇨에서 히푸르산의 배설을 확인하였다. 또 다른 연구에서는 벤조산 0.3% 첨가사료 급여 시 분뇨 pH가 8.25로, 대조구 (pH 8.59)보다 0.34 낮았고, 뇨의 pH 또한 대조구 pH 7.73, 처리구 pH 7.30으로 0.43 감소하여 뇨의 산성화가 분뇨 pH 감소에 영향을 준 것으로 나타났다 (Humphrey *et al.*, 2022). Kim *et al.* (2025) 연구에서도 벤조산 1% 첨가사료를 급여한 돼지 뇨의 pH가 6.21로, 대조구 (pH 7.37)에 비해 1.16 낮았다. 이들 선행연구는 벤조산 첨가사료를 급여시킨 후 채취한 분과 뇨를 인위적으로 혼합하여 pH를 측정할 반면, 본 연구는 지속적으로 돼지 분뇨가 배설되는 돈방 피트로부터 슬러리를 채취하여 분석하였기 때문에 절대적 수치에 비교는 어렵다. 다만, 벤조산 첨가사료 급여 돈방의 슬러리 pH가 대조구에

비해 pH 0.45가 낮아진 것은 Eriksen *et al.* (2014)과 Humphrey *et al.* (2022)의 연구 결과와 유사하였다. 그리고 본 연구는 처리구 간의 시험환경이 유사한 조건에서 수행하였고, pH가 처리구 간에 유의적 차이가 있었기에 결과의 신뢰성은 확보할 수 있었다. 뿐만 아니라 선행연구와 달리 누적효과가 반영된 pH를 확인함으로써 현장 조건을 반영하였다는 점에서 의미가 있었다.

벤조산 (C₆H₅COOH)의 또 다른 작용기전으로, 소화과정에서 아미노산인 글리신 (NH₂CH₂COOH)과 결합하는 기전은 일반적인 아미노산의 질소 대사경로를 통한 요소 (NH₂CONH₂) 형태의 질소 배설을 줄이고, 히푸르산 (C₆H₅CONHCH₂COOH) 형태의 배설을 증가시켜 뇨 중 요소 배설을 감소시킨다 (C₆H₅COOH + NH₂CH₂COOH + glycine N-acyltransferase → C₆H₅CONHCH₂COOH + H₂O; Buhler *et al.*, 2006).

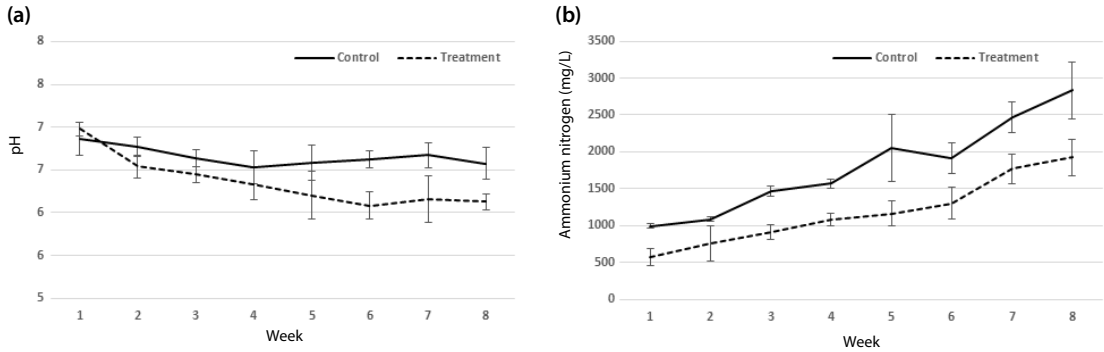


Fig. 5. Weekly changes in slurry pH (a) and ammonium nitrogen concentrations (b).

돈방 피트에서 노 중 요소는 분 중 우레아제에 의해 분해되어 암모늄을 생성하는데 ($\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Urease} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{CO}_2 + 2\text{OH}^-$), 벤조산은 이 과정의 최종 산물인 암모늄의 생성을 억제한다 (Cortus, 2006). 그림 5에서 암모늄 질소의 농도는 시험 1주차 대비 8주차에 대조구에서 994.7 mg/L에서 2833.6 mg/L로 1839.0 mg/L 증가한 반면, 처리구에서는 576.5 mg/L에서 1922.1 mg/L로 1345.6 mg/L 증가하여 대조구보다 증가폭이 작았다. 시험기간 동안 암모늄 질소 농도가 증가한 것은 매일 돼지 분뇨가 피트로 유입되어 요소와 우레아제가 반응하였기 때문이다. 시험기간 동안 평균적으로 암모늄 질소 농도는 대조구(1798.0 mg/L)에 비해 처리구(1185.8 mg/L)에서 34.0% 낮았다. Murphy *et al.* (2011)의 연구에서도 벤조산 3% (30 g/kg as fed) 첨가사료를 10일간 급여한 결과, 돼지 분뇨 내 암모늄 질소 농도가 대조구 7.38 g/kg 대비 처리구 3.30 g/kg으로 55% 감소하였다. 또 다른 연구에서는 21일간 벤조산 0.5% (5 g/kg as fed) 첨가사료 급여 시, 돼지 분뇨의 암모늄 질소 농도와 요소 배출이 각각 8% 감소하였다 (Halas *et al.*, 2010). 선행연구 결과를 기반으로 벤조산 2% 첨가사료 급여 시 슬러리 내 암모늄 질소 농도는 약 35~37% 감소할 것으로 예측되었으며, 이는 본 연구 결과(암모늄 농도 34.0% 감소)와 유사한 경향을 보였다.

결과를 정리하면, 처리구 슬러리의 pH와 암모늄 질소 농도는 시험기간 동안 유의하게 낮아졌고, 이는

공기 중 암모니아 저감에 기여하였다. 암모니아 휘산은 슬러리의 pH, 암모늄 질소 및 온도와 선형적 상관성을 가지며, 세 지표의 수치가 낮아지면 암모니아 휘산이 감소하게 된다 (Sommer *et al.*, 2022; Chaoui *et al.*, 2008). 다만 암모늄 질소 농도의 평균 감소율은 공기 중 암모니아 감소율보다 작았다. 이는 슬러리가 저장된 피트보다 돈방 내부의 공기 교환이 활발하여 암모니아가 더 쉽게 제거될 수 있다. 뿐만 아니라 벤조산이 슬러리 pH를 낮추어 암모니아 휘산을 억제하는 효과와 더불어 요소 배설 감소에 따른 암모늄 질소 농도의 감소가 동시에 작용하였기 때문이다 (Li *et al.*, 2012; Buhler *et al.*, 2006; Cortus, 2006; Ni *et al.*, 1999). 실제로 Montes *et al.* (2009)의 공식에 따라 계산하였을 때, 동일한 조건에서 pH 7에서 pH 6으로 낮아지면 암모니아 휘산량은 약 0.1배, 암모니아 플럭스는 약 90% 감소하는 것으로 나타났다. 한편 슬러리 pH가 낮아지면 암모니아/암모늄 평형이 암모늄 우세로 이동하여, 암모니아 휘산은 줄어들어도 슬러리 내 암모늄 질소 농도는 상대적으로 높게 관찰될 수 있다. 이러한 이유로 슬러리 내 암모늄 질소 농도의 감소율보다 공기 중 암모니아 감소율이 더 크게 나타난 것으로 해석된다. 그렇다면 연구 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여, 돈방 내부 환경변수의 영향을 배제하고 상대적으로 환경변화가 적은 슬러리 성분 자체를 이용하여 암모니아 배출량을 산정한 후 저감 효과를 평가하였다. 이를 위해 본 연구는 슬러리 pH

와 암모늄 질소 농도를 이용하여 자유 암모니아 총 배출량을 산정하고, 실측된 공기 중 암모니아 배출량과 비교를 통해 결과의 타당성을 검증하였다.

3.3 자유 암모니아 총 배출량

공기 중 암모니아 농도는 온도, 습도, 환기량 등 다양한 환경변화에 의해 영향을 받지만, 자유 암모니아 총 배출량(이하 잠재적 배출량)은 상대적으로 환경변화의 영향을 적게 받는 슬러리 성분(pH, 암모늄 질소 등)을 기반으로 산정되므로, 벤조산 첨가사로 급여에 따른 암모니아 저감 효과를 객관적으로 평가하는 데 유용하다(Montes *et al.*, 2009; Arogo *et al.*, 1999). 특히 벤조산의 작용에 따른 슬러리 pH와 암모늄 질소 농도의 감소가 실제 암모니아 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있고, 공기 중 암모니아 배출의 인과성을 규명하는 근거를 제공한다. 자유 암모니아는 슬러리에서 공기 중으로 휘산될 가능성을 가진 암모니아의 잠재적 배출 농도로, 슬러리 내 pH와 암모늄 질소 농도를 곱하여 공기 중으로 휘산될 암모니아 농도를 계산한 후 켈빈 온도로 보정한 측정온도(20°C)를 나누어 계산하였다. 자유 암모니아 총 배출량은 자유 암모니아 농도에 헨리상수(0.79), 대기 중 암모니아 농도(2.59 mg/m³), 피트 내부의 질량전달계수(5.91×10⁻⁶ m/s), 슬러리 표면적(44.66 m²)을 곱하여 계산하였다(Montes *et al.*, 2009; Arogo *et al.*, 1999). 자세한 계산식은 2.4 자유 암모니아 총 배출량 및 통계분석 부분에 정리하였다.

그림 6은 자유 암모니아 총 배출량과 돈방 배기구의 암모니아 배출량 실측치(이하 실 배출량)를 함께 나타낸 것이다. 자유 암모니아 총 배출량은 계산된 추정치이고, 실 배출량은 슬러리 채취와 동일한 시기의 암모니아 농도를 이용하여 배출량을 산정하였다. 이에 두 지표 간의 절대적인 배출량 수치는 차이가 있으나, 암모니아 휘산과 직접적으로 연관된 주요 변수를 기반으로 자유 암모니아 총 배출량을 산정하였기 때문에 상대적 변화 추세를 비교하는 데는 유효하다(Ni, 1999). 시험기간 동안 처리구별 잠재적 배출량과 실 배출량의 변화 양상은 유사한 경향을 보였으며

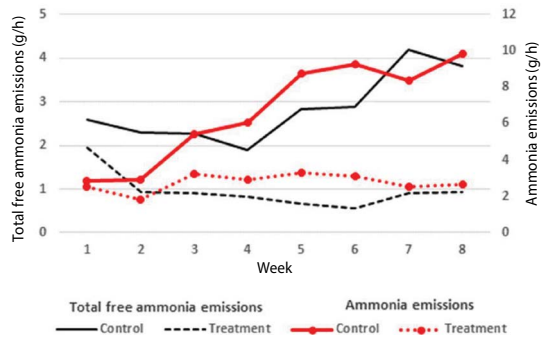


Fig. 6. Weekly changes in total free ammonia emissions and measured ammonia emissions at the exhaust outlet.

(그림 6), 두 배출량의 정량적 관계는 스피어만 순위 상관계수와 비선형 회귀분석 결과를 통해 확인하였다. 스피어만 순위상관계수는 대조구 $\rho=0.95$ 와 처리구 $\rho=0.79$ 로 양의 상관성을 나타내었고($P<0.05$), 비선형 회귀모델의 결정계수는 대조구 $R^2=0.93$ ($E=1.326 \times J^{1.106}$)와 처리구 $R^2=0.80$ ($E=2.480 \times J^{0.245}$)로 산정되었다. 통계분석 결과, 잠재적 배출량은 실 배출량과 강한 양의 상관성을 가지며 실 배출량 변동을 설명할 수 있었다.

자세한 결과를 살펴보면, 대조구의 잠재적 배출량은 시험 1주차 2.6 g/h에서 8주차 3.8 g/h로 1.2 g/h 증가한 반면, 처리구는 2.0 g/h에서 0.9 g/h로 1.1 g/h 감소하였다. 실 배출량 또한 대조구의 경우 시험 1주차 2.9 g/h에서 8주차 9.9 g/h로 6.0 g/h이 증가하였으나, 처리구는 2.5 g/h에서 2.6 g/h로 큰 변동이 없었다. 처리구의 잠재적 배출량과 실 배출량이 시험기간 동안 일정하게 유지된 것은 벤조산 첨가사료의 지속적인 급여에 따른 슬러리 pH와 암모늄 질소 농도의 감소가 암모니아 배출량의 증가를 억제했기 때문으로 판단된다. 일반적으로 슬러리 pH 7.0에서 0.5 단위씩 낮아질수록 공기 중 암모니아 휘산량은 비선형적으로 감소하며, 이때 암모늄 질소 농도의 동시 감소는 암모니아 휘산 저감 효과를 더욱 강화시킨다(Ellersiek and Olf, 2024). 본 연구에서 처리구의 pH가 6.5에서 6.0으로 낮아질 때, 암모니아 휘산량 감소폭이 확대되는 경향을 보였다. 이는 슬러리 pH가 암모니아와

암모늄 간의 평형을 지배하며, pH 6.0 이하에서는 암모니아로의 전환이 급격히 저하되기 때문이다(Li *et al.*, 2012). 이러한 이유로 처리구는 잠재적 배출량뿐만 아니라 실 배출량 역시 대조구보다 낮게 유지되었다. 또한 두 배출량은 시험기간이 경과할수록 처리구 간에 차이가 점차 확대되었으며, 8주 평균을 기준으로 처리구의 잠재적 배출량은 대조구 대비 66.1% (대조구 2.8 g/h, 처리구 1.0 g/h), 실 배출량은 58.8% (대조구 6.7 g/h, 처리구 2.7 g/h) 감소하였다. 결과적으로 벤조산 첨가사로 급여는 슬러리 pH와 암모늄 질소 농도를 낮추어 잠재적 암모니아 배출량을 줄였으며, 이러한 화학적 변화는 실측된 암모니아 배출량 감소로 연결된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 돼지에 벤조산 첨가사로 급여가 돈사 유래 암모니아 배출 저감에 미치는 영향을 평가하기 위해 57일(약 8주) 동안 공기 중 암모니아 농도를 실시간으로 측정하여 저감 효과를 분석하였다. 그리고 슬러리 성분을 이용하여 산출한 자유 암모니아 총 배출량과 돈방 배기구의 암모니아 농도로 산정한 실 배출량과의 비교 분석을 통해 공기 중 암모니아 저감 효과의 인과성을 규명하였다. 그 결과, 벤조산 첨가사를 급여한 처리구의 돈방 내부와 배기구의 암모니아 농도가 각각 53.5~53.7%와 47.8~48.3% 감소하였으며, 이에 따라 환기량 기반 연간 암모니아 배출계수가 1.1 kg/head-yr에서 0.5 kg/head-yr로 54.5% 저감되었다. 또한 암모니아 농도의 일일 변동폭이 처리구에서 절반 수준으로 감소하여, 벤조산 첨가사의 급여는 암모니아 배출을 안정적이고 효과적으로 제어함을 확인하였다. 슬러리 성분의 경우, 처리구의 pH와 암모늄 질소 농도가 대조구에 비해 유의적으로 낮았다. 특히 암모늄 질소 농도는 대조구에 비해 처리구에서 평균 34.0% 감소하였다. 이는 벤조산이 글리신과 결합하여 히프르산으로 배설됨으로써 슬러리 pH를 낮추고, 동시에 요소 배설 감소에 의한 암모늄 질

소 생성을 저해한 결과로 해석된다. 여기서 슬러리 pH 감소는 암모니아/암모늄 평형을 암모늄 우세로 이동시켜 암모니아 휘산 잠재력을 낮추었으며, 동시에 암모늄 질소 농도의 감소는 암모니아 휘산 저감 효과를 강화시켰다. 이러한 상호작용이 암모니아 배출 저감에 미치는 영향을 정량적으로 검증하기 위해 슬러리 pH와 암모늄 질소 농도를 기반으로 자유 암모니아 총 배출량(잠재적 배출량)을 산정하고, 실제 배기구의 암모니아 농도로 산정된 실 배출량과 비교하였다. 그 결과, 두 배출량은 높은 양의 상관성을 보였으며, 8주 평균을 기준으로 대조구 대비 처리구의 잠재적 배출량은 66.1%, 실 배출량은 58.8% 낮았다. 따라서, 벤조산 첨가사의 급여는 슬러리 pH와 암모늄 질소의 생성을 줄여 암모니아 휘산 잠재력을 감소시켰으며, 이는 실제 암모니아 배출량이 저감되는 효과로 이어졌다. 본 연구는 사료첨가제의 암모니아 저감 실효성을 현장시험으로 입증하고, 슬러리 성분을 활용한 잠재적 암모니아 배출량과 실측 배출량의 정량적 인과 구조를 규명하였다는 점에서 의미가 있다. 사료첨가제를 이용한 암모니아 저감은 분뇨를 통한 질소 배출을 줄여 암모니아가 생성되는 것을 원천적으로 차단한다. 이 접근은 슬러리 처리시설, 저감장치 등과 같은 암모니아 저감 기술들과 달리 별도의 설비가 필요하지 않고, 운영비용이 낮으며, 기존 배합 사료에 첨가하면 되기에 즉시 적용이 가능하다는 점에서 경제적이고 현장 적용성이 높다. 또한 암모니아 발생원 단계의 저감기술은 정부의 사전 예방적 배출 관리 정책 방향과 부합하고, 농가 규모에 상관없이 적용이 가능하다는 점에서 정책적 수용성을 가진다. 따라서 사료 기반 암모니아 저감기술은 운영의 단순성, 경제성 및 정책 부합성을 동시에 확보할 수 있는 저감 대안으로, 이 기술에 대한 효능 평가는 현장 실무와 정책적으로 활용될 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 자유 암모니아 총 배출량 개념을 응용한 암모니아 저감 기술의 효능 평가법은 관련 연구자를 위한 학술적 정보를 제공함으로써 연구, 현장 및 정책을 동시에 확보한 연구로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (RS-2022-RD010 356, PJ017087)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Aarnink, A.J.A. (1997) Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate, and behaviour, Wageningen University and Research, Wageningen, Netherlands. 83pp.
- Arogo, J., Westerman, P.W., Heber, A.J. (2014) A review of ammonia emissions from confined swine feeding operations, *Transactions of the ASAE*, 46(3), 805-817. <https://doi.org/10.13031/2013.13597>
- Arogo, J., Zhang, R.H., Riskowski, G.L., Christianson, L.L., Day, D.L. (1999) Mass transfer coefficient of ammonia in liquid swine manure and aqueous solutions, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999(73), 77-86. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0390>
- Buhler, K., Wenk, C., Broz, J., Gebert, S. (2006) Influence of benzoic acid and dietary protein level on performance, nitrogen metabolism and urinary pH in growing-finishing pigs, *Archives of Animal Nutrition*, 60, 382-389. <https://doi.org/10.1080/j.anifeedsci.2010.10.009>
- Cao, Y., Bai, Z., Misselbrook, T., Wang, X., Ma, L. (2021) Ammonia emissions from different pig production scales and their temporal variations in the North China Plain, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 71(1), 23-33. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1815895>
- Clean Air Policy Support System (CAPSS). (2024) Emissions by sector. <http://www.air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30> (accessed on Oct. 17, 2025).
- Chaoui, H., Montes, F., Rotz, C.A., Richard, T.L. (2008) Dissociation and mass transfer coefficients for ammonia volatilization models. 2008 ASABE Annual International Meeting, Paper Number: 083802, Rhode Island, USA.
- Choi, H., Kim, S.W. (2024) Dietary intervention of benzoic acid for intestinal health and growth of nursery pigs, *Animals*, 14(2394), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ani14162394>
- Cortus, E.L. (2006) A dynamic model of ammonia production within grow-finish swine barns, A Thesis for the Degree of Doctor of philosophy, In the Department of Agriculture and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Canada.
- Ellersiek, N.C.T., Olfs, H-W. (2024) An incubation system for the simulation of ammonia emissions from soil surface-applied slurry: Effect of pH and acid type, *Agronomy*, 14(1078), 1-16. <https://doi.org/10.3390/agronomy14051078>
- Eriksen, J., Norgaard, J.V., Poulsen, H.D., Poulsen, H.V., Jensen, B.B., Petersen, S.O. (2014) Effects of acidifying pigs diets on emissions of ammonia, methane, and sulfur from slurry during storage, *Journal of Environmental Quality*, 43, 2086-2095. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.03.0108>
- Fangueiro, D., Hjorth, M., Gioelli, F. (2015) Acidification of animal slurry - a review, *Journal of Environmental Management*, 149, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.001>
- Fortune Business Insights (FBI) (2025) Feed additives market. <https://www.fortunebusinessinsights.com/feed-additives-market-104345> (accessed on Oct. 17, 2025).
- 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, 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.021>
- Hafner, S.D., Pacholski, A., Bittman, S., Carozzi, M., Chantigny, M., Genermont, S., Hani, C., Hansen, M.N., Huijsmans, J., Kupper, T., Misselbrook, T., Neftel, A., Nyord, T., Sommer, S.G. (2019) A flexible semi-empirical model for estimating ammonia volatilization from field-applied slurry, *Atmospheric Environment*, 199, 474-484. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.034>
- Halas, D., Hansen, C.F., Hampson, D.J., Kim, J.-C., Mullan, B.P., Wilson, R.H., Pluske, J.R. (2010) Effects of benzoic acid and inulin on ammonia-nitrogen excretion, plasma urea levels, and the pH in faeces and urine of weaner pigs, *Livestock Science*, 134, 243-245. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.06.153>
- Horizon Grand View Research (HGVR) (2025) Pig/Swine - Animal feed additives market, 2018-2030. <https://www.grandviewresearch.com/horizon/statistics/animal-feed-additives-market/livestock/pig-swine/global> (accessed on Oct. 17, 2025).
- Humphrey, D.C., Bergstrom, J.R., Calvo, E.P., Trabue, S.L., Scoggins, K.D., Greiner, L.L. (2022) The effect of benzoic acid with or without a direct-fed microbial on the nutrient metabolism and gas emissions of growing pigs, *Journal of Animal Science*, 100, 1-11. <https://doi.org/10.1093/jas/skac296>

- Kim, S.W., Choi, H., Lin, C., Mateo, R.D. (2025) Effects of increasing levels of benzoic acid fed to pigs on nitrogen utilization and metabolism affecting growth performance, ammonia emissions, and carcass characteristics, *Journal of Animal Science*, 103, skaf101, 1-12. <https://doi.org/10.1093/jas/skaf101>
- Korea Environment Coporation (KEC) (2024) 2023 Nationwide odor complaint statistics and field survey report. Incheon, Republic of Korea. <https://www.keco.or.kr> (accessed on Oct. 17, 2025).
- Korea Rural Economic Institute (KREI) (2024) Agricultural outlook 2024: Agriculture and rural areas in an era uncertainty - Challenges and the future, Naju, Republic of Korea. <https://www.krei.re.kr> (accessed on Oct. 17, 2025).
- Li, L., Lollar, B.S., Li, H., Wortmann, U.G., Lacrampe-Couloume, G. (2012) Ammonium stability and nitrogen isotope fractionations for NH_4^+ - $\text{NH}_3(\text{aq})$ - $\text{NH}_3(\text{gas})$ systems at 20-70°C and pH of 2-13: Applications to habitability and nitrogen cycling in low-temperature hydrothermal systems, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 84, 280-296. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.01.040>
- Liu, J., Li, X., Xu, Y., Wu, Y., Wang, R., Zhang, X., Hou, Y., Qu, H., Wang, L., He, M., Kupczok, A., He, J. (2023) Highly efficient reduction of ammonia emissions from livestock waste by the synergy of novel manure acidification and inhibition of ureolytic bacteria, *Environment International*, 172, 107768. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107768>
- Liu, Y., Bgo, H.H., Guo, W., Peng, L., Wang, D., Ni, B. (2019) The roles of free ammonia (FA) in biological wastewater treatment processes: A review, *Environment International*, 123, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.039>
- Maher, S., Sweeney, T., O'Doherty, J.V. (2025) Optimising nutrition for sustainable pig production: Strategies to quantify and mitigate environmental impact. *Animals*, 15(1403), 1-42. <https://doi.org/10.3390/ani15101403>
- Ministry of Environment (MOE) (2023) 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 Oct. 17, 2025).
- 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) (2024) Water quality pollution process test standards. <https://www.law.go.kr> (accessed on Jan. 15, 2025).
- Ministry of Government Legislation - National Law Information Center (MOLEG) (2025) Standard and Specifications for feed, etc. <https://www.law.go.kr> (accessed on Oct. 17, 2025).
- Montes, F., Rotz, C.A., Chaoui, H. (2009) Process modeling of ammonia volatilization from ammonium solution and manure surfaces: A review with recommended models, *Transactions of the ASABE*, 52, 5, 1707-1719. <https://doi.org/10.13031/2013.29133>
- Murphy, D.P., O'Doherty, J.V., Boland, T.M., O'Shea, C.J., Callan, J.J., Pierce, K.M., Lynch, M.B. (2011) The effect of benzoic acid concentration on nitrogen metabolism, manure ammonia and odour emissions in finishing pigs, *Animal Feed Science and Technology*, 163, 2011, 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.10.009>
- Ni, J.Q. (1999) Mechanistics models of ammonia release from liquid manure: A review, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, 72, 1-17. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0342>
- Ni, J.Q., Vinckier, C., Coenegrachts, J., Hendriks, J. (1999) Effect of manure on ammonia emission from a fattening pig house with partly slatted floor, *Livestock Production Science*, 59, 1999, 25-31. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00002-0)
- OECD-FAO (2025) OECD-FAO Agricultural outlook 2025-2034, Paris and Rome. <https://doi.org/10.1787/601276cd-en> (accessed on Oct. 17, 2025).
- Official Journal of the European Union (OJEU) (2024) Commission implementing regulation (EU) 2024/1730 of 20 Jun 2024 concerning the authorisation of benzoic acid as a feed additive for weaned piglets and pigs for fattening. Regulation (EC) No 1831/2003. https://www.european-council.europa.eu/media/e060404d-1230-476a-9000-000118011111/asset/document/2024/06/20241730_en.pdf

- eur-lex.europa.eu (accessed on Oct. 17, 2025).
- 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>
- 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>
- Sommer, S.G., Hafner, S.D., Laubach, J., van det Weerden, T.J., Leytem, A.B., Pacholski, A. (2022) Model for calculating ammonia emission from stored animal liquid manure, *Biosystems Engineering*, 223, 41-55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.08.007>
- U.S. Government Information (USGI) (2014) 21 CFR Ch. I (4-1-25 Edition) §573.210 Benzoic acid. <https://www.govinfo.gov> (accessed on Oct. 17, 2025).
- 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>

Authors Information

- 황옥화 (농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과 연구사) (hoh1027@korea.kr)
- 이혜민 (농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과 전문연구원) (hyemin7682@korea.kr)
- 위지수 (농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과 연구사) (jisoowi@korea.kr)
- 박준수 (농촌진흥청 국립축산과학원 스마트축산환경과 연구사) (karmon2@korea.kr)