Journal of Environmental Science International
35(10); 995~1003; October 2026
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2026.35.10.995

SHORT COMMUNICATION

제주지역 상업용 양돈시설에서 돈사 유형 및 조사 시기별 암모니아 농도 특성: 현장 사례연구

고민정[1)] · 조은일[1)] · 고용국[1)] · 이현정 · 박민규[*]
제주대학교 환경공학과, [1)]제주녹색환경지원센터(제주악취관리센터)

Ammonia Concentrations by Housing Type and Sampling Period at a Commercial Swine Facility in Jeju, Korea: A Field Case Study

Min-Jeong Ko[1)], Eun-Il Cho[1)], Yongguk Ko[1)], Hyunjung Lee, Min-Kyu Park[*]
Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
[1)]Jeju Green Environment Center (Jeju Odor Management Center), Jeju 63309, Korea

Abstract

This field case study investigated ammonia (NH_3) concentrations at a medium-scale commercial swine facility in Jeju, Korea, under routine operating conditions. Air samples were conducted during the daytime and nighttime in summer and winter at multiple locations, including breeding, growing, and finishing houses, a composting facility, outdoor locations, and an exhaust outlet. Ammonia concentrations ranged from 0.07 to 24.29 ppm across all sampling locations and periods. Concentrations were consistently low outdoor but substantially higher inside the pig houses. The mean indoor NH_3 concentration increased from 3.44 ppm in summer to 13.92 ppm in winter, reaching 4.05 times the summer value (a 304.7% increase). The highest concentration (24.29 ppm) was observed in the sow house during the daytime in winter. The elevated concentration in the sow house was attributed to the high ammonia emission factor associated with sows, the fully slatted floor, prolonged manure retention due to the absence of a slurry recirculation system, and restricted ventilation. Although the mean concentration at the growing–finishing house exhaust outlet (3.75 ppm) was approximately 66% lower than the corresponding mean indoor concentration (11.16 ppm), outlet concentrations exceeded the relevant emission standard at certain times. These findings indicate that ammonia concentrations in swine facilities are strongly influenced by housing design and operating conditions, underscoring the need to manage internal emission sources in addition to monitoring concentrations at the facility boundary.

Key words : Ammonia, Swine facility, Spatiotemporal variation, Housing structure, Field measurement

1. 서 론

국내·외 양돈산업은 지난 수십 년간 대형화·집약화가 진행되면서 생산성은 향상되었으나, 사육밀도 증가와 분뇨 발생량 확대에 따라 암모니아와 같은 유해가스 발생 문제는 지속적으로 심화되고 있다(Piccardo et al., 2022; Cao et al., 2023). 암모니아는 양돈시설에서 대표적으로 발생하는 가스상 물질로, 작업환경 악화뿐 아니라 인근 지역의 악취 민원과 직결되는 주요 관리 대상 물질로 인식되고 있다.

Received 10 August, 2026; **Revised** 2 October, 2026;
Accepted 8 October, 2026
***Corresponding author** : Min-Kyu Park, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3442
E-mail : mkpark@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

양돈시설에서 암모니아의 발생과 축적은 사육 단계별 돈사 구조, 분뇨 저장 및 처리 방식, 환기 시스템 등 운영 조건에 따라 크게 달라진다(Kim et al., 2012a; Mielcarek and Rzeznik, 2015). 동일 농장 내에서도 돈사 유형, 계절 및 시간대에 따라 암모니아 농도는 뚜렷한 차이를 보일 수 있으며, 이러한 시·공간적 변동성은 단일 지점 또는 제한된 조건에서 수행된 측정 결과만으로는 충분히 설명되기 어렵다. 암모니아는 양돈시설에서 상시적으로 발생하는 주요 가스상 물질로서, 환기 조건과 작업 활동 변화에 민감하게 반응하여 상대적으로 짧은 시간 범위에서도 농도 변동성이 크게 나타날 수 있으며, 이러한 특성은 외부 또는 부지경계 중심의 측정만으로는 파악에 한계가 있다.

제주지역에서도 규모화된 양돈시설 증가와 주거지 인접 문제로 인해 암모니아를 포함한 악취 민원이 지속적으로 제기되어 왔다(Cha, 2025). 제주특별자치도는 「악취 배출허용기준 조례」를 통해 엄격한 관리 기준을 적용하고 있으나, 대부분의 양돈시설은 「악취방지법」에서 규정하는 일정한 악취배출구를 갖추고 있지 않아, 악취 측정이 주로 부지경계선 중심으로 이루어지고 있다. 이러한 경계 중심 측정 방식은 인접 농가의 영향, 기상 조건 변화, 지형 및 차단 구조물 등에 의해 측정 결과가 크게 변동될 수 있으며, 시설 내부에서 실제로 발생·축적되는 암모니아의 농도 수준과 공간적 분포를 충분히 반영하지 못하는 구조적 한계를 지닌다(Kang, 2023).

현행 악취 관리 제도는 복합악취를 기준으로 악취 배출 여부를 판단하고, 지정악취물질은 부지경계선 농도를 기준으로 관리하도록 규정하고 있다(MCEE, 2025a; MCEE, 2025b). 그러나 양돈시설과 같이 여러 농가가 밀집된 환경에서는 외부 배출원의 영향을 완전히 배제하기 어렵고, 방풍벽·차단벽·건축물 배치 등에 따른 공기 흐름 왜곡으로 인해 부지경계선 측정값이 실제 내부 발생 특성을 대표하지 못하는 사례가 빈번히 보고되고 있다. 이러한 한계는 복합악취 평가의 대표성과 신뢰성을 저하시킬 뿐 아니라, 주요 기여물질 중 하나인 암모니아의 실제 발생 특성과 제도적 평가 결과 간의 괴리를 확대시키며, 그 결과 행정 판단의 해석 차이를 야기하여 농가와 행정기관 간의 갈등을 유발하는 요인으로 작용한다.

최근 국가 차원에서도 양돈시설 형태별 냄새 및 가스 발생 특성과 배출 특성을 규명하기 위한 현장 기반 조사 연구가 추진되고 있으나, 제주지역과 같이 해양성 기후의 영향으로 계절별 외기 온도, 습도 및 풍향·풍속 조건이 크게 달라지는 지역을 대상으로 한 실측 연구는 여전히 제한적이다. 제주지역 양돈장은 해안과 인접한 개방적 입지 및 농가 밀집 구조를 보이는 경우가 많아, 외기 유입과 배출 공기의 확산 양상이 주변 기상, 건축물 배치, 방풍시설 및 돈사 개방 정도에 의해 영향을 받을 수 있다. 특히, 여름철에는 자연환기 또는 혼합환기 운전이 증가하여 내부 오염물질의 희석은 촉진될 수 있으나, 풍향 변화에 따라 배출 공기가 인접 시설 또는 부지경계 방향으로 이동할 가능성도 존재한다. 반면, 겨울철에는 보온을 위해 측창 및 출입구를 폐쇄하고 기계 환기량을 낮추는 경향이 있어, 돈사 내부 암모니아의 축적 가능성이 증가한다. 따라서 제주지역 양돈시설의 암모니아 농도는 단순한 계절 차이뿐 아니라, 지역 기상조건과 돈사 구조 및 환기 제어 방식의 상호작용을 고려하여 해석할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 제주지역에 위치한 상업용 양돈시설 1개소를 대상으로, 암모니아 농도의 시·공간적 분포 특성을 실측 자료를 기반으로 분석하였다. 돈사 내부, 외부 및 배출구 등 다지점에서 여름철과 겨울철, 주·야간 시간대로 구분하여 측정을 수행함으로써, 실제 운영 조건에서의 암모니아 농도 변화를 비교·분석하였다. 본 연구 결과는 양돈시설 내 암모니아 발생 특성에 대한 이해를 높이고, 현행 부지경계 중심 평가 방식의 한계를 보완할 수 있는 측정·평가 체계 개선을 위한 과학적 근거 자료로서, 향후 관리 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 대상 양돈장의 시설 특징

본 연구는 제주특별자치도 제주시 한림읍 금능리에 위치한 상업용 양돈시설을 대상으로 수행하였다(33°35‘N, 126°25‘E). 해당 농장은 약 170두의 모돈을 사육하며, 연간 2,500~3,500두를 생산하는 규모로, 국가통계포털(KOSIS)에서 제시하는 중규모 양돈장(1,000~4,999두 생산)에 해당한다. 제주지역은 동일 권역 내에 다수의 양돈시설이 인접하여 운영되는 밀집형 공간 구조를 보이며, 연구 대상 농장은 이러한 지역적 특성을 반영하는 중규모 상업용 양돈시설 중 하나로, 주변 농가와 시설 구성 및 운영 조건이 유사하다.

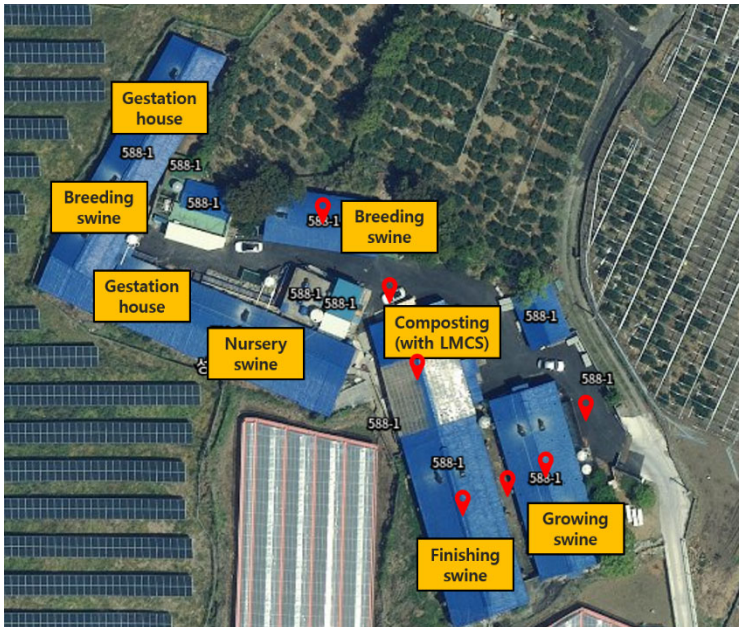


Fig. 1. Spatial layout of study area and locations of ammonia sampling sites (Red pins indicate the sampling sites for odor measurement).

조사 대상 농장의 총 면적은 약 1,950 m²로, 총 7동의 돈사와 퇴비화 시설, 액비 저장조, 창고 및 관리사무실로 구성되어 있다(Fig. 1). 모돈사와 이유자돈사는 전면 슬러리 피트 구조를, 육성사와 비육사는 부분 슬러리 피트 구조를 채택하고 있으며, 모든 돈사는 주 1회 정기적인 바닥 청소를 수행하고 있다. 본 연구에서는 모돈사 세 동 중 구조 및 운영 특성이 대표적인 한 동을 선정하여 조사를 수행하였다. 해당 모돈사는 면적 190 m², 사육두수 80두로 한 두당 사육면적은 2.38 m²/두였으며, 육성사와 비육사의 한 두당 사육면적은 각각 0.72 m²/두, 1.14 m²/두로 모두 적정 사육면적 기준을 만족하였다.

환기 방식은 돈사 유형과 계절에 따라 상이하였다. 모돈사는 여름철에도 밀폐 상태에서 기계 환기 방식으로 운영되었으며, 육성사와 비육사는 여름철에는 자연환기, 겨울철에는 기계 환기를 병행하였다. 육성사와 비육사의 환기팬 배출구는 하나의 공간으로 집약되어 있으며, 해당 공간은 바이오 커튼으로 덮인 밀폐 구조를 갖추고 있다.

악취 저감 시설로는 안개 분무 장치, 바이오 커튼, 액비순환시스템이 설치되어 있으며, 액비순환시스템은 육성사와 비육사에만 적용되고 있다. 비육사는 퇴비사와 인접하여 액비가 실시간으로 순환되는 구조인 반면, 육성사는 액비를 일시 저장한 후 일정 간격으로 이송하는 방식으로 운영되어, 액비 순환량은 육성사 약 3 ton/day, 비육사 약 7 ton/day로 차이를 보였다. 본 농장의 일일 가축분뇨 발생량은 평균적으로 분 1.6 ton/day, 뇨 8.4 ton/day로 나타났으며, 이러한 시설 및 운영 조건은 본 연구에서 관측된 암모니아 농도의 시·공간적 변동성을 해석하는 데 중요한 기초 정보를 제공한다.

2.2. 시료 채취 및 분석 방법

암모니아 시료 채취는 2024년 8월부터 12월까지 총 4회에 걸쳐 수행되었으며, 조사일마다 주간과 야간으로 구분하여 1일 2회 채취하였다. 채취 지점은 모돈사, 육성사, 비육사 내부를 중심으로 육성·비육사 배출구, 퇴비사 내부 및 외부, 육성사 외부 지점으로 구성하였다. 이는 양돈시설 내 주요 발생원과 외부 확산 특성을 동시에 고려하기 위한 조사 설계로, 조사 시기별 기상조건 및 채취 관련 정보는 Table 1에 제시하였다.

암모니아 시료 채취 및 분석은 「악취공정시험기준」의

Table 1. Meteorological conditions and sampling details

Sampling site		Date	Time	Temperature (°C)	Humidity (%)	Weather
Breeding house	Inside	8/31	13:30-15:30	31.7	56.0	Clear
			20:00-22:00	27.4	71.0	Clear
		12/22	13:30-15:30	23.3	61.0	Clear
			20:00-22:00	23.4	86.0	Clear
Growing house	Inside	8/31	13:30-15:30	33.8	60.0	Clear
			20:00-22:00	26.2	79.0	Clear
		12/22	13:30-15:30	24.2	46.0	Clear
			20:00-22:00	24.6	94.0	Clear
	Outside	8/31	13:30-15:30	34.3	60.0	Clear
			20:00-22:00	27.3	77.0	Clear
		12/22	13:30-15:30	6.5	37.0	Clear
			20:00-22:00	5.6	52.0	Clear
Finishing house	Inside	8/31	13:30-15:30	32.4	60.0	Clear
			20:00-22:00	25.5	83.0	Clear
		12/22	13:30-15:30	23.8	58.0	Clear
			20:00-22:00	24.5	77.0	Clear
Growing·Finishing house	Outlet	12/22	13:30-15:30	9.7	58.0	Clear
			20:00-22:00	10.5	49.0	Clear
Compost facility	Inside	8/31	13:30-15:30	32.9	64.0	Clear
			20:00-22:00	28.5	81.0	Clear
		12/22	13:30-15:30	14.1	49.0	Clear
			20:00-22:00	13.4	79.0	Clear
	Outside	8/31	13:30-15:30	31.7	61.0	Clear
			20:00-22:00	27.6	78.0	Clear
		12/22	13:30-15:30	6.9	38.0	Clear
			20:00-22:00	5.3	52.0	Clear

암모니아–붕산용액 흡수법–자외선·가시선 분광광도법(ES 09302.1c)을 준용하여 수행하였다. 시료 채취에는 흡수액 채취장비(SCS-210M, Odortech)를 사용하였으며, 채취된 시료는 기준에서 제시한 절차에 따라 전처리 후 자외선/가시선 분광광도계(UV-1280, Shimadzu)를 이용하여 640 nm 파장에서 분석하였다. 분석 결과의 신뢰성 확보를 위해 검정곡선, 방법검출한계(method detection limit, MDL), 정밀도(relative standard deviation, RSD)를 포함한 내부정도관리를 수행하였으며, 각각 R^2=0.9999, MDL 0.008 ppm, RSD 6.5%로 해당 시험기준에서 제시한 허용 범위를 만족하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 암모니아의 시·공간적 농도 분포 특성

대상 농가에서 측정된 암모니아 농도는 여름철과 겨울철에 각각 0.07~6.86 ppm, 0.14~24.29 ppm의 범위를 보였다(Table 2; Fig. 2). 「악취방지법」에서 규정하는 기타지역 부지경계 배출허용기준(1 ppm)으로 평가할 경우, 외부 지점을 제외한 대부분의 측정 지점에서 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 특히, 돈사 내부에서는 여름철 평균 3.44 ppm, 겨울철 평균 13.92 ppm으로 확인되어, 외부 평균 농도(0.32 ppm)에 비해 현저히 높은 수준을 보였다. 이는 부지경계 또는 외부 측정만으로는 돈사 내부에서 실제로 발생·축적되는 암모니아 농도 수준을 충분히 반영하기 어렵다는 점을 시사한다.

Table 2. Ammonia (NH_3) concentrations (ppm) by facility partition (inside/outside) across summer/winter and day/night

Partition		NH_3 (ppm)			
		Summer		Winter	
		Day	Night	Day	Night
Breeding house	Inside	6.86	6.32	24.29	14.59
Growing house	Inside	1.68	1.62	8.37	10.22
	Outside	0.16	0.25	8.66	0.25
Finishing house	Inside	1.51	2.63	14.91	11.14
Growing·Finishing house	Outlet	-	-	3.30	4.19
Compost facility	Inside	1.88	2.77	3.40	3.40
	Outside	0.07	0.42	0.91	0.14

* Each value represents a single field measurement at the corresponding location and sampling period (n=1). Therefore, standard deviations were not calculated.

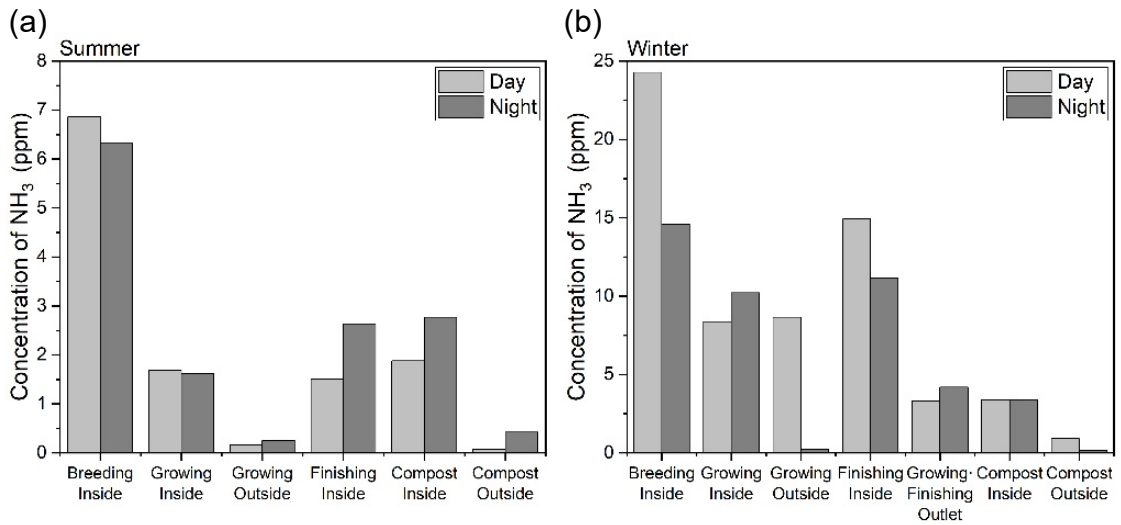


Fig. 2. Diurnal variations of ammonia (NH_3) concentrations in livestock housing and composting environments in (a) summer and (b) winter.

시설별 암모니아 농도는 모든 조사 시기 중 모돈사 내부에서 가장 높은 수준을 나타냈다. 모돈사 내부의 최대 농도는 여름철 6.86 ppm, 겨울철 24.29 ppm으로, 다른 돈사 대비 약 2~3배 높은 값을 보였다. 이는 모돈이 생육 단계 중 암모니아 배출계수(14.3 kg/animal/yr)가 가장 높은 개체군에 해당하며, 전면 슬러리피트 구조와 액비순환시스템이 적용되지 않은 운영 특성으로 인해 분뇨의 체류 시간이 길어진 결과로 판단된다. 또한 모돈사는 여름철에도 밀폐된 상태에서 기계 환기 방식으로 운영되어 외기 유입이 제한되며, 이로 인해 내부에서 발생한 암모니아가 충분히 희석·배출되지 못하고 축적된 것으로 해석된다. 즉, 본 연구에서 확인된 모돈사의 고농도 암모니아는 사육 단계별 질소 배출 특성과 돈사 구조, 환기 운영 방식이 복합적으로 작용한 결과로 해석될 수 있다.

육성사와 비육사 내부에서도 모든 시점에서 배출허용기준을 초과하는 암모니아 농도가 관측되었다. 두 돈사는 동일한 부분 슬러리피트 구조와 액비순환시스템을 갖추고 있으나, 겨울철에는 비육사에서 다소 높은 농도가 나타났다. 이는 비육돈의 단위 개체당 암모니아 배출계수

(7.22 kg/animal/yr)가 육성돈(5.21 kg/animal/yr)보다 높기 때문으로 판단된다. 다만 일반적으로 비육사에서 가장 높은 암모니아 농도가 보고된 선행연구(Kim et al., 2012a; Kim et al., 2012b)와 달리, 본 연구에서는 모돈사에서 최고 농도가 관측되었으며, 이는 돈사 구조와 환기 방식, 분뇨 관리 체계의 차이가 암모니아 농도에 결정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 이러한 결과는 암모니아 농도가 단순히 사육단계나 사육 밀도뿐 아니라, 시설별 운영방식과 관리 조건에 의해 크게 좌우될 수 있음을 보여준다.

퇴비사 내부의 암모니아 농도는 여름철 평균 2.33 ppm, 겨울철 평균 3.40 ppm으로 배출허용기준을 초과하였으나, 두 계절 간 농도 수준은 비교적 유사한 범위를 보였다. 이는 퇴비화 과정에서의 암모니아 발생이 일정 수준으로 지속되며, 퇴비사 구조상 발생 가스가 내부에 장기적으로 축적되기보다는 비교적 빠르게 외부로 확산되는 특성을 가지기 때문으로 해석된다. 따라서 퇴비사는 돈사 내부에 비해 암모니아 농도의 계절적 변동 폭이 상대적으로 크지 않은 공간으로 평가된다.

3.2. 주·야간 및 계절에 따른 암모니아 농도 변동 특성

암모니아 농도의 주·야간 변동을 분석한 결과, 전체적으로 시간대에 따른 차이는 크지 않았으나, 계절별 환기 조건과 온도 변화에 따라 서로 다른 경향이 관찰되었다. 여름철에는 혼합식 환기 방식이 적용되어 환기량이 비교적 높게 유지되었으며, 이로 인해 전반적인 암모니아 농도 수준은 겨울철에 비해 낮게 나타났다. 이는 환기 강화가 돈사 내부 암모니아 농도를 효과적으로 저감하는 주요 요인임을 보여준다.

여름철 암모니아 농도는 야간 시간대에 주간보다 다소 높은 경향을 보였다. 이는 주간 고온 환경에서 돼지의 활동량이 감소하면서 분뇨 교란이 상대적으로 줄어들고, 야간에는 외기 온도 하강과 함께 돼지의 활동성이 증가하면서 암모니아 발생이 일시적으로 증가한 결과로 해석된다. 이러한 경향은 여름철 돼지의 활동이 하루 두 차례 정점(오전 8시와 오후 19시)을 보인다는 선행연구 결과와도 일치한다(Brumm, 2006). 즉, 여름철 암모니아 농도의 일중 변동은 온도 조건뿐 아니라 돼지의 행동 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

반면, 겨울철에는 돈사 보온을 위해 밀폐 운영이 이루어지면서 환기가 제한되고, 그 결과 여름철에 비해 전반적으로 높은 암모니아 농도가 관측되었다. 특히 겨울철 암모니아 농도는 주간 시간대에 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 주간 동안 돼지의 활동 증가와 이에 따른 내부 온도 상승으로 분뇨 표면에서의 암모니아 휘산이 촉진된 결과로 해석된다. 이러한 경향은 돼지의 일중 활동 리듬과 밀접한 관련이 있으며, 겨울철 돼지의 활동성이 오후 14시를 중심으로 단일 피크 경향성을 보인다고 보고되었다(Brumm, 2006). 또한, 겨울철 실내 공기 오염물질 농도가 돼지의 활동이 증가하는 오후 14:00~17:00 시간대에 가장 높게 나타난다고 보고되었다(Choi et al., 2007). 본 연구에서 확인된 겨울철 주간 암모니아 농도 증가 경향은 이러한 선행연구 결과와 일치하며, 겨울철 밀폐 운영 조건에서 제한된 환기와 돼지 활동 증가가 복합적으로 작용할 경우 암모니아 농도 상승이 더욱 두드러질 수 있음을 시사한다.

종합적으로 암모니아 농도의 일중 변동은 단순한 발생량 차이보다는 계절별 운영 방식과 온도 조건, 그리고 돼지의 활동 패턴이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 이러한 경향은 암모니아 배출의 일주기 변동이 동물 활동의 일주기 변동과 높은 상관관계(R^2=0.94)를 나타낸다고 보고한 Blanes-Vidal et al.(2008)의 연구 결과와 유사한 경향을 보였다. 따라서 암모니아 관리를 위해서는 계절 및 시간대별 특성을 고려한 운영 및 관리 전략이 병행될 필요가 있다.

3.3. 내부-외부-배출구 농도 비교를 통한 확산 특성 고찰

암모니아의 공간적 확산 특성을 평가하기 위해 내부, 외부 및 배출구 지점의 농도를 비교하였다. 외부 지점에서 측정된 암모니아 농도는 대부분 1 ppm 이하로 나타나 배출허용기준을 초과하지 않았으며, 이는 내부에서 발생한 암모니아가 외부로 확산되는 과정에서 상당 부분 희석되었음을 의미한다. 다만, 겨울철 주간 시간대의 육성사 외부에서는 내부와 유사한 농도가 관측되었는데, 이는 측정 직전 수행된 돈사 내부 청소 작업으로 인해 내부에 체류하던 암모니아가 단기간 외부로 유출된 결과로 판단된다. 이는 작업 활동과 같은 일시적 교란 요인이 외부 암모니아 농도에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

겨울철에 측정된 육성·비육사 통합 배출구의 평균 암모니아 농도는 3.75 ppm으로, 내부 평균 농도인 11.16 ppm에 비해 약 66% 낮은 수준을 나타냈다. 이러한 농도 감소에는 배출 과정에서의 외기 유입 및 혼합, 유속 변화와 난류 형성에 따른 물리적 희석 효과가

우선적으로 작용했을 가능성이 있다. 그러나 해당 배출구는 바이오 커튼으로 덮인 집약 배출 공간에 위치하므로, 바이오 커튼 내부 여재 또는 수분층과의 접촉 과정에서 발생할 수 있는 암모니아의 흡착, 용해 및 미생물학적 전환 등의 저감 기여도 일부 포함되었을 가능성도 배제하기 어렵다.

다만, 본 연구에서는 바이오 커튼 전·후의 농도, 통과 풍량, 체류시간 및 여재의 운전 상태를 별도로 측정하지 않았으므로, 관측된 농도 감소를 희석 효과와 바이오 커튼의 물리·화학적 또는 생물학적 저감 효과로 정량적으로 구분하는 데에는 한계가 있다. 향후에는 바이오 커튼 전·후 동시 측정과 풍량 측정을 병행하여, 저감시설 자체의 제거효율과 배출공기의 희석 효과를 구분하여 평가할 필요가 있다. 그럼에도 배출구 농도가 일부 조사 시점에서 부지경계 배출허용기준을 상회하였다는 점은 저감시설의 존재만으로는 충분하지 않으며, 돈사 내부 암모니아 발생을 줄이기 위한 관리가 병행되어야 한다.

겨울철에 측정된 육성·비육사 통합 배출구의 평균 암모니아 농도는 3.75 ppm으로, 내부 평균 농도(11.16 ppm)에 비해 약 66% 저감된 수준을 나타냈다. 이는 배출 과정에서 외부 공기와의 혼합, 유속 변화 및 난류 형성 등에 따른 희석 효과가 작용한 결과로 해석된다. 그럼에도 불구하고 배출구 농도는 배출허용기준을 초과하는 수준으로 나타나, 배출 과정에서 일정 수준의 희석 효과가 발생하더라도 내부 발생 특성이 배출구 농도에 직접적으로 반영될 수 있음을 시사한다. 이는 배출구 농도가 내부 암모니아 관리 수준을 간접적으로 반영하는 지표로 활용될 수 있음을 의미한다.

한편, 내부 지점에서는 모든 조사 시점에서 암모니아 농도가 배출허용기준을 초과하였으며, 특히, 모돈사 내부에서는 최대 24.29 ppm으로 관측되었다. 본 측정값은 단시간 측정 결과이므로, 8시간 시간가중평균농도(time-weighted average, TWA) 기준인 25 ppm과 직접적으로 비교하거나 TWA 초과 여부를 판단할 수는 없다. 다만, 단시간 측정값이 25 ppm 수준에 근접하였다는 점은 해당 농도 조건이 장시간 지속되거나 작업활동 중 일시적 농도 상승이 추가될 경우 작업자의 8시간 평균 노출이 증가할 가능성을 시사한다. 따라서 모돈사와 같이 고농도가 관측된 공간에서는 작업시간 관리, 환기 강화 및 작업 시 개인보호구 착용 등 작업환경 관리가 필요하다. Park et al.(2013)과 Lee et al.(2020)는 청소, 백신 투약, 사료 배합·배분과 같은 작업 활동에 따라 암모니아 농도가 단기간 급격히 상승할 수 있음을 보고하였다. 특히, 작업 강도가 높은 시점에서 NH_3 농도가 평균 대비 약 4.5배 증가하고, 이로 인해 TWA를 빈번히 초과할 수 있음을 제시하였다(Lee et al., 2020). 이러한 선행연구 결과를 고려할 때, 양돈시설의 암모니아 관리는 외부 확산 저감뿐 아니라 작업활동을 고려한 내부 작업환경 관리 측면에서도 중요한 과제로 판단된다.

본 연구는 제주지역 상업용 양돈시설 1개소를 대상으로 여름철과 겨울철에 각각 1일씩, 주간 및 야간 시간대로 구분하여 수행한 현장 조사 결과에 기반하였다. 따라서 본 결과는 대상 농장의 조사 시점별 운영 조건에서 확인된 암모니아 농도 특성을 제시한 것으로, 제주지역 전체 양돈시설 또는 계절별 평균 농도를 대표하는 데에는 한계가 있다. 특히, 암모니아 농도는 외기 온·습도, 풍향·풍속, 환기팬 가동 상태, 사육두수 변동, 분뇨 처리 및 청소 작업 등 단기적 운영 요인에 따라 크게 변동할 수 있다. 복수 농가를 대상으로 계절별 반복 측정, 연속 모니터링 및 환기량·기상 자료를 병행하여 시·공간적 대표성을 확대할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 제주지역에 위치한 중규모 상업용 양돈시설 1개소를 대상으로, 돈사 유형 및 조사시기별 암모니아 농도 특성을 현장 측정을 통해 평가하였다. 조사 결과, 암모니아 농도는 외부보다 돈사 내부에서 현저히 높게 나타났으며, 모든 조사 시기에서 모돈사 내부의 농도가 가장 높게 관측되었다. 이는 모돈의 상대적으로 높은 암모니아 배출 특성과 전면 슬러리피트 구조, 액비순환 시스템 미적용에 따른 분뇨 체류시간 증가 및 밀폐형 환기 운영이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

계절별로는 겨울철 돈사 내부 평균 암모니아 농도가 여름철보다 높게 나타났으며, 이는 보온을 위한 밀폐 운영과 환기량 감소로 인해 내부에서 발생한 암모니아가 충분히 희석·배출되지 못하고 축적된 데 기인한 것으로 해석된다. 반면, 여름철에는 자연환기 또는 혼합식 환기 운영에 따른 환기량 증가로 상대적으로 낮은 농도가 유지되는 경향을 보였다. 또한 육성·비육사 통합 배출구의 암모니아 농도는 내부 평균농도보다 약 66% 낮게 나타났으나, 이는 배출 과정에서의 외기 혼합과 희석, 그리고 바이오 커튼의 저감 효과가 함께 반영된 결과일 가능성이 있다. 다만, 본 연구에서는 바이오 커튼 전·후

농도와 풍량을 별도로 측정하지 않았으므로, 희석 효과와 저감시설 자체의 제거효율을 정량적으로 구분하는 데에는 한계가 있다. 이러한 결과는 부지경계 또는 외부 지점의 측정만으로는 돈사 내부의 암모니아 축적 수준과 작업환경 노출 가능성을 충분히 평가하기 어렵다는 점을 보여준다. 따라서 양돈시설의 암모니아 관리는 부지경계 중심의 평가와 함께, 돈사 구조, 분뇨 관리 방식 및 계절별 환기 운영을 고려한 내부 발생원 관리가 병행될 필요가 있다.

실무적으로 농가에서는 모돈사와 같이 전면 슬러리피트 및 밀폐형 환기 조건을 갖는 고농도 공간을 우선 관리 대상으로 설정할 필요가 있다. 이를 위해 슬러리피트 내 분뇨의 체류시간을 줄일 수 있도록 정기적인 배출·이송 또는 액비순환 적용 가능성을 검토하고, 겨울철에는 돈사 보온성을 유지하는 범위에서 최소환기를 적절히 운영할 필요가 있다. 또한 청소 및 분뇨 이송 등 고농도 발생 가능 작업 시에는 환기량을 일시적으로 높이고, 작업시간 관리와 적절한 호흡보호구 착용을 병행하는 것이 바람직하다. 행정기관은 저감시설의 설치 여부뿐 아니라 전·후 농도, 운전 조건 및 유지관리 상태를 포함한 성능 중심의 관리체계를 마련할 필요가 있다.

본 연구는 양돈시설의 암모니아 저감을 위해 내부 발생원 관리, 계절별 환기 운영 및 저감시설의 성능 관리가 함께 이루어져야 함을 보여주었으며, 현장 맞춤형 관리방안 및 측정·평가체계 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 다만, 본 연구는 단일 농가의 제한된 조사시점에 수행된 사례연구이므로, 향후에는 반복측정과 장기 모니터링을 통해 시설별·계절별 농도 변동성과 저감시설의 관리 효과를 추가로 검증이 필요하다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 제주특별자치도의 재원으로 제주앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(앵커)의 결과입니다(2026-ANCHOR-17-001).

REFERENCES

Blanes-Vidal, V., Hansen, M. N., Pedersen, S., Rom, H. B., 2008, Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow, Agric. Ecosyst. Environ., 124(3-4), 237-244.

Brumm, M., 2006, Patterns of drinking water use in pork production facilities, Nebraska Swine Reports, University of Nebraska-Lincoln, Nebraska, USA.

Cao, T., Zheng, Y., Dong, H., 2023, Control of odor emissions from livestock farms: A Review, Environ. Res., 225, 115545.

Cha, S. H., 2025, Assessment of odor contribution and distribution characteristics of odorous compounds from swine facilities in Jeju, Master's thesis, Jeju National University, Jeju, Korea.

Choi, H. L., Kim, K. Y., Kim, H., 2007, Correlation of air pollutants and thermal environment factors in a confined pig house in winter, Asian-Australas. J. Anim. Sci., 18(4), 574-579.

Kang, M. S., 2023, Comparison of odor reduction effects according to odor reduction facility types in pig farms in Jeju-do, Doctoral dissertation, Jeju National University, Jeju, Korea.

Kim, J. H., Yoo, K. S., Oh, J. B., Jung, J. Y., 2012, Study on the characteristics of odor emitted from swine facilities, J. Korean Soc. Environ. Eng., 34(7), 439-444.

Kim, K., Ko, H., Kim, H., 2012, Comparison of seasonal concentration of ammonia and hydrogen sulfide in swine house according to pig's growth stage, J. Agric. Life Sci., 46(2), 163-68.

Lee, S. W., Kim, H. C., Seo, I. H., 2020, Monitoring of internal harmful factors according to environmental factors in pig farm, J. Korean Soc. Agric. Eng., 62(1), 105-115.

MCEE (Ministry of Climate, Energy and Environment), 2025a, Enforcement rule of the odor prevention act, Attached Table 3, Ordinance of the Ministry of Climate, Energy and Envurinment (No. 1), Sejong, Korea, https://www.law.go.kr

MCEE (Ministry of Climate, Energy and Environment), 2025b, Odor prevention act, Act (No. 21065), Sejong, Korea, https://www.law.go.kr

Mielcarek, P., Rzeźnik, W., 2015, Odor emission factors from livestock production, Pol. J. Environ. Stud., 24(1), 27-35.

Park, J., Kang, T., Seok, J., Jin, S., Heo, Y., Kim, K., Lee, K., Yoon, C. 2013, Real-time monitoring of ammonia and hydrogen sulfide according to workplace at swine farms, J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg., 23(4), 402-411.

Piccardo, M. T., Geretto, M., Pulliero, A., Izzotti, A., 2022, Odor emissions: A Public health concern for health risk perception, Environ. Res., 204, 112121.

- Professor. Min-Kyu Park
  Department of Environmental Engineering, Jeju National University
  mkpark@jejunu.ac.kr
- Professor. Hyunjung Lee
  Department of Environmental Engineering, Jeju National University
  hyunjunglee@jejunu.ac.kr
- Professor. Eun-Il Cho
  Department of Environmental Engineering, Jeju National University Jeju Green Environment Center (Jeju Odor Management Center)
  eunilcho@jejunu.ac.kr
- Doctor's course. Yongguk Ko
  Department of Environmental Engineering, Jeju National University Jeju Green Environment Center (Jeju Odor Management Center)
  dydrnr215@naver.com
- Master's degree. Min-Jeong Ko
  Department of Environmental Engineering, Jeju National University Jeju Green Environment Center (Jeju Odor Management Center)
  kmnjg1011@naver.com