

논문

돈사에서 배출되는 암모니아 제거 관점에서 바이오커튼의 효능 평가

Evaluation of the Effectiveness of Bio-curtains for Ammonia Removal in Pig Facility

황옥화*, 이연아, 박준수, 서시영, 우샘이, 이준엽

농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과

Okhwa Hwang*, YeonA Lee, Junsu Park, Siyoung Seo,
Saem-Ee Woo, Jun Yeob Lee

Animal Environment Division, National Institute of Animal Science,
Rural Development Administration, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

접수일 2024년 12월 4일
수정일 2025년 1월 30일
채택일 2025년 2월 10일

Received 4 December 2024
Revised 30 January 2025
Accepted 10 February 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)63-280-7408
E-mail : hoh1027@korea.kr

Abstract This study evaluated the effectiveness of bio-curtains (hereafter referred to as curtains) installed in a pig facility from the perspective of ammonia emissions rather than ammonia concentration, as done in previous studies. The curtains were constructed by covering a rectangular frame with mesh, and they were installed outside the exhaust fans on the sidewalls of a pig facility where 48 finishing pigs (average weight 93 kg) were being raised. The experiment measured ammonia concentrations at the exhaust fan and the outer surface of the curtain under different spraying conditions (40 minutes and 70 minutes of spraying cycles) inside the curtain and exhaust fan operation rates (30%, 50%, 70%, and 100%). The ammonia emissions were calculated by multiplying the measured ammonia concentrations by the ventilation rates, and the reduction rates of ammonia emissions were then determined. The results showed that the ammonia emission reduction rates decreased step-wise with the increase in the exhaust fan operation rate under all spraying conditions. This trend was attributed to the decreased contact rate between the ammonia in the ventilated air and the spraying water inside the curtain due to increased ventilation rates and air exchange rates as the exhaust fan operation rate increased. Furthermore, when comparing the ammonia emission reduction rates between the spraying conditions, the reduction rate was approximately 3.90% higher under the spraying cycles of 40-minutes (23.66%) compared to the spraying cycles 70 minutes (19.76%). In conclusion, reduce the spraying cycle by 30 minutes (increasing the frequency of spraying by two-fold) enhanced the contact rate between ammonia and the spraying water, resulting in a 3.90% higher reduction in ammonia emissions.

Key words: Ammonia, Bio-curtain, Emission, Exhaust fan operation rate, Spraying conditions

1. 서론

2020년 기준, 국내 가축 사육두수는 총 247,111천 두, 가축 분뇨발생량은 139,753톤/일로, 이 중 돼지 분뇨가 40% (56,270톤/일)로 가장 높은 비율을 차지하였다 (LEMI, 2022). 가축 분뇨는 축사 내·외부의 악취 발생 요인으로 축산농가의 악취민원을 발생시키고 있다. 2022년 축산악취민원은 전년 대비 11.7% ('21, 15,462건 → '22, 13,656건) 감소하였지만, 총 악취민원 중 축산악취민원의 비율이 두 해 모두 60%로 동일하

여 지속적으로 축산악취민원이 발생되고 있었다 (MOE, 2023). 이에 정부는 2021년 축산법 개정을 통해 축산업 종사자에 대한 악취저감시설 설치 의무화를 시행하여 축산농가의 악취관리 의무를 강화하고 (NLIC, 2021), 깨끗한 축산농장 조성을 위해 가축분뇨 처리지원 사업을 실시하여 축산농가의 악취저감시설 개·보수 비용을 지원하고 있다 (MAFRA, 2024). 그리고 2022년 농림축산식품부의 “농·축산분야 차미세먼지와 암모니아 배출량 감축 정책” 발표를 통해 축산농가에서 고농도로 발생하는 암모니아가 미세먼지의 전

구체로 작용함이 알려지며 축산농가의 악취 문제가 더욱 주목받았다. 축산분야의 암모니아 배출량은 182천 톤으로 국내 전체 배출량(261천 톤)의 69.7%를 차지하였고, 이 중 돼지가 79천 톤으로 가장 많이 배출되면서 악취에 이어 미세먼지 배출 주범으로 지목되었다(NAIR, 2023). 이에 돼지 사육농가는 축산악취민원 대응, 정부 정책 이행 및 축산업 운영을 위해서 악취저감시설 설치가 필수적이다.

현재 축산농가는 악취저감을 위해 안개분무(43.1%), 바이오커튼(30.6%), 세정탑(14.8%)을 설치하고 있으며, 돼지 사육농가의 경우 71.7%가 안개분무를 이용하고 있다(LEMI, 2022). 안개분무는 축사 외부, 농장 주변, 분뇨처리시설 주변 및 악취저감장치 중 하나인 바이오커튼(이하 커튼) 내부에 설치하고 있다. 이 중 커튼은 미국에서 Barriers 또는 Windbreak walls로 불리는 메쉬망(차광막)으로 처음 등장하였으며, 가축사육 농가의 축사 환기팬에 설치하여 축사에서 배출되는 먼지와 오염물질의 확산을 방지한다(AMPAT, 2014). 국내에서는 다른 악취저감장치에 비해 설치, 사용 및 관리가 용이하여 많은 농가에서 활용 중이며, 돼지 사육농가의 경우 돈사 측벽 환기팬 주변에 설치한 후 커튼 내부에 물, 탈취제 등을 살포하여 악취물질 확산을 방지하고 있다(Hwang *et al.*, 2024).

커튼의 악취저감 효능에 관한 연구는 주로 축산농가에 설치된 커튼을 대상으로 농가의 운영 조건(커튼 규모, 안개분무 조건 등)에 따른 악취저감 효과를 평가하였다. 이때 악취물질은 주로 가스검지관과 전기화학식 센서를 이용하여 암모니아 농도를 측정하였다(RDA, 2020). 그러나 선행연구들은 연구자마다 악취 측정 위치가 다르고, 농가를 대상으로 시험하면서 농가별로 다른 장치 운영 조건의 영향으로 악취저감 효과에 차이를 보였다. 농촌진흥청(RDA, 2020) 연구에서는 연구자마다 다른 평가 방법으로 인해 커튼의 암모니아 저감률이 국내 연구에서는 14~98%, 국외 연구에서 8~13%로 큰 차이가 있음을 지적하였다. 이러한 결과가 도출된 것은 국내의 경우 가축 사육시설에 설치된 악취저감장치에 대한 평가 프로토콜이 없어 객관적인 효능 평가가 어렵기 때문이다. 반면, 국외는

암모니아의 농도가 아닌 배출량 관점에서 정량화한 악취저감장치 효능 평가 프로토콜을 개발하여 암모니아 저감량을 제시하고 있으며, 주로 환기량 측정이 용이한 단일 배출구의 밀폐형인 악취저감장치를 평가하였다(VERA, 2018). 그러나 커튼은 넓은 면적의 메쉬망을 통해 커튼 표면의 다지점에서 공기가 배출되기 때문에 국외 평가 프로토콜을 그대로 반영하기에 한계가 있다. 이에 본 연구는 선행연구에서 수행되지 않은 암모니아 배출량 관점에서 커튼의 암모니아 저감 효과에 대한 정량적 평가를 시도하였다. 시험은 국립축산과학원 내 환경조절이 가능한 돈사에서 돈사 규모에 맞게 규격화한 커튼을 설치한 후 커튼의 규모와 성능 및 농가 상황을 고려한 안개분무 조건으로 암모니아 배출 저감 효과를 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 돈사 및 커튼의 특성

본 시험에 이용된 돈사는 강제환기식 밀폐형 돈사(W 7 m×L 8 m, 콘슬랏 바닥)이며, 커튼이 설치된 돈사에는 비육돈 48두(평균 체중 93 kg)를 사육하였다. 커튼은 알루미늄 배관으로 된 직육면체 골조(W 4.7 m×L 2.6 m×H 3.1 m; 37.9 m³)에 메쉬망을 덮어 제작하였고, 돈사 외부 측벽에 설치된 1개의 환기팬(600 mm, 최대 환기량 11760 m³/h, COCO-630A model, Dongsung CoCofan Ltd, Gyeonggi-do, Republic of Korea) 주변에 설치하였다(그림 1). 돈사 환기팬은 바람, 눈, 비 등이 환기팬 내부로 유입되는 것을 방지하기 위해 90도로 꺾인 후드가 환기팬 외부에 설치되어 있다. 후드는 돼지 사육농가에서 일반적으로 사용되고 있으며, 돈사에서 배출되는 공기가 바닥에 부딪친 후 배출되어 악취확산을 방지하는 기능도 있다. 커튼 내부에는 바닥에서 2.1 m 높이에 4개의 안개분무 노즐이 일정한 간격으로 설치된 안개분무 배관이 설치되었다. 안개분무 용액으로 수돗물을 이용하였으며, 분당 0.291 L(4개 노즐에서 분무되는 양의 합)가 살포되었다.

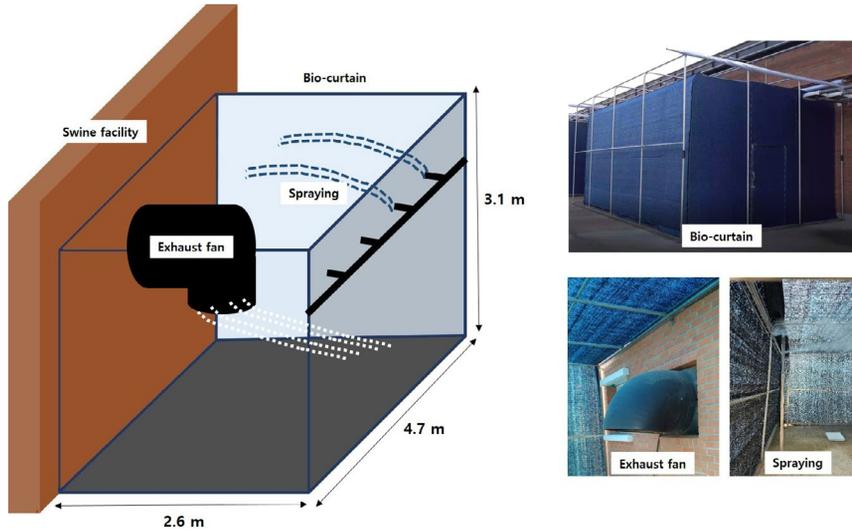


Fig. 1. The curtain constructed around an exhaust fan with an inner diameter of 600 mm outside of the swine facility.

2.2 풍속 및 암모니아 농도 측정

풍속과 암모니아 농도는 암모니아 배출량 계산을 위해 이용되는 항목으로, 본 연구에서는 돈사 환기팬과 커튼 외부 표면에서 측정하였다(그림 2). 먼저 풍속 측정 방법은 선행연구를 통해 제시한 것과 같이, 돈사 환기팬의 풍속은 환기팬 내부에 총 12개 지점에서 측정하였고, 커튼 외부 표면은 동일한 면적으로 총 42구획을 나눈 각 구획의 중심부에서 측정하였다(Hwang *et al.*, 2024). 이때 풍속은 돈사 환기팬을 30% ($0.27 \text{ m}^3/\text{s}$), 50% ($0.45 \text{ m}^3/\text{s}$), 70% ($1.03 \text{ m}^3/\text{s}$), 100% ($1.24 \text{ m}^3/\text{s}$)로 각각 가동한 상태에서 측정하였으며, 각 측정 지점의 면적을 곱하여 돈사 환기팬 가동률에 따른 환기량을 계산하였다.

돈사 환기팬의 환기량은 커튼의 공기교환율(Air exchange rate, Eq. 1), 액체-기체 접촉률(Liquid to gas ratio, Eq. 2), 암모니아 배출량(Emissions, Eqs. 3, 4), 암모니아 배출 저감률(Reduction rate, Eq. 5) 계산을 위해 이용하였다. 암모니아와 같이 물에 대한 용해도가 높은 물질은 액체와 기체가 접촉하는 시간이 길수록 저감 효과가 높아진다(Morral *et al.*, 2021; Huang, 2005). 본 연구에서는 돼지 사육농가에서 주로 사용하는 두 가지 안개분무 사이클(분무 사이클 40분과 70

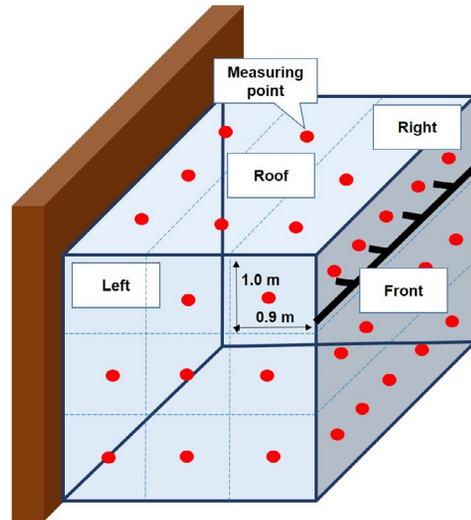


Fig. 2. The sections of equal area divided to measure air velocity discharged outside the curtain.

분)을 적용하여, 안개분무 사이클을 단축하면 액체-기체 접촉률이 증가하여 암모니아 배출 저감 효과가 커질 것이라는 가정을 검토하기 위해 액체-기체 접촉률을 계산하였다. 관련 산식은 단락 아래에 정리하였다(Eqs. 1~5). 커튼 외부 표면의 풍속 측정 지점의 면적을 반영하여 환기량을 산출하고자 하였으나, 측정

된 풍속은 환기팬 가동률에 상관없이 모두 0 m/s로 측정되었다(Hwang *et al.*, 2024). 이는 돈사 환기팬에서 배출된 공기가 커튼 외부로 전량 배출된 후 신속히 확산되어 풍속이 측정되지 않은 것이다. 결과적으로 커튼 외부로 배출되는 공기의 환기량은 돈사 환기팬의 환기량과 같음을 가정할 수 있으며, 커튼 외부로 배출되는 암모니아 배출량은 돈사 환기팬의 환기량을 이용하여 계산하였다.

암모니아 농도는 커튼 내부에 안개분무를 가동한 상태에서, 단계적으로 돈사 환기팬 가동률을 30%, 50%, 70%, 100%로 높이면서 측정하였다. 자세한 측정 순서는 1회 안개분무 사이클 40분 조건(10분 분무, 30분 휴지)에서, 환기팬을 30%로 가동한 후 5일간 암모니아 농도를 측정하였다. 5일 후 안개분무 가동을 잠시 멈추고, 환기팬을 50%로 가동한 후 5일간 암모니아 농도를 측정하였다. 환기팬 가동률 70%와 100%에서도 동일한 순서로 실시하였으며, 본 시험 종료 후에는 1회 안개분무 사이클 70분 조건(10분 분무, 60분 휴지)에서 동일한 순서로 암모니아 농도를 측정하였다. 암모니아 측정 위치는 돈사 환기팬의 경우 환기팬 중앙에서 측정하였고, 커튼 외부 표면은 직육면체인 각 표면의 중앙 1개 지점에서 커튼 표면으로부터 5 cm 떨어진 곳에서 측정하였다(Hwang *et al.*, 2023). 암모니아 농도는 멀티샘플러(INNOVA 1409, Lumasense Technology Advanced Energy, CO, USA)가 장착된 광음향분광분석 장비(INNOVA 1512, Lumasense Technology Advanced Energy, CO, USA)를 이용하여, 각 환기팬 가동률별로 5일 동안 실시간으로 측정하였다. 암모니아 농도는 1시간 간격으로, 각 측정 지점별로 6회씩 연속적으로 측정하였다. 암모니아 측정 장비는 시료 1개당 암모니아 측정 시간이 66초(가스 흡입 5초, 측정 50초, 플러싱 11초)이고, 측정된 암모니아 농도는 1 ppm 이하로 확인이 가능하다. 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 측정한 암모니아 농도로 작성하였다.

$$\text{Eq. 1. Air exchange rate (1/s)} = \text{ventilation rate (m}^3\text{/s)} / \text{volume inside the curtain (m}^3\text{)}$$

$$\text{Eq. 2. Liquid to gas ratio (L/m}^3\text{)} = \text{spraying liquid (L/min)} / [\text{exhaust fan's ventilation rate (m}^3\text{/s)} \times 60]$$

$$\text{Eq. 3. Emissions (mg/s)} = \text{ventilation rate (m}^3\text{/s)} \times \text{ammonia concentration (mg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Eq. 4. Ammonia concentration (mg/m}^3\text{)} = \text{concentration (ppm)} \times (\text{molecular weight}/24.45) \times [273.16/(273.16 + 20)]$$

$$\text{Eq. 5. Reduction rate (\%)} = (\text{emission from the exhaust fan} - \text{emission from the curtain}) / \text{emission from the exhaust fan} \times 100$$

2.3 커튼 내부 안개분무 조건 및 안개분무액 이화학적 성분 분석 방법

안개분무는 1회 분무 사이클이 총 40분(10분 분무, 30분 휴지)과 70분(10분 분무, 60분 휴지) 간격으로 구성하였다. 분무 시간은 커튼 내부에 안개분무가 가득차는 데 걸리는 시간이고, 휴지 시간은 돼지 사육 농가에서 일반적으로 이용하는 시간으로 설정하였다. 이화학적 성분 분석을 위한 안개분무액 시료는 커튼 내부에 안개분무를 가동하는 상태에서 커튼 내부 바닥으로 떨어지는 안개분무 폐액(Wastewater)과 안개분무액인 수도물(Tap water)을 채취하였다. 이화학적 성분은 수질오염공정시험기준(NLIC, 2023)에 준한 방법으로 pH, 전기전도도(Electrical conductivity, EC; ES 04310.1c), 염분(Salts), 킬달 질소(Total Kjeldahl nitrogen, TKN; ES 04363.3b), 암모니아성 질소(Total ammoniacal nitrogen, TAN; ES 043551.1c), 질산성 질소(Nitrate, NO₃⁻; ES 043551.1c)를 분석하였다. 분석 방법을 정리하면, pH, 전기전도도 및 염분은 각 프로브가 장착된 분석 장비(Model 850C, Schott, Mainz, Germany)를 이용하여 측정하였으며, 본 장비는 pH 프로브의 range pH -2.000~pH +19.999, accuracy pH

± 0.005 와 mV 프로브의 range -999.9 mV~ $+999.9$ mV, accuracy ± 0.3 mV의 사양을 갖추었다. 킬달 질소, 암모니아성 질소 및 질산성 질소는 킬달 장치(Vapodest 50s, Gerhardt GmbH, Wiesbaden, Germany)를 이용하여 분석하였으며, 분석 전에 킬달 질소는 과염소산(Perchloric acid, HClO_4), 황산(Sulfuric acid, H_2SO_4) 및 수산화나트륨(Sodium hydroxide, NaOH)을 이용하여 전처리하고, 암모니아 질소 및 질산성 질소는 염화칼륨(Potassium chloride, KCl)과 산화마그네슘(Magnesium oxide, MgO)을 이용하여 전처리한 후 분석하였다. 킬달 장치는 용해 시간 2~4분, 회수율 99.5% 이상, 재현성 ± 1 및 검출한계 0.1 mg-N의 사양을 갖추었다.

2.4 통계 분석

환기팬 가동률 간의 공기교환율 및 암모니아 분석 결과의 유의적 차이를 분석하기 위해 SAS version 9.2 (SAS, 2016)를 이용하여 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 커튼의 공기교환율 및 액체-기체 접촉률

커튼의 공기교환율은 돈사 배출 공기 중의 암모니아(기체)와 커튼 내부에 살포되는 안개분무(액체)의 접촉률을 변화시켜 암모니아 저감에 영향을 준다. 본 연구에서 공기교환율은 돈사 환기팬 가동률 증가에 따른 환기량 증가와 함께 단계적으로 높아졌으며, 환기팬 가동률 70% ($1.03 \text{ m}^3/\text{s}$)와 100% ($1.24 \text{ m}^3/\text{s}$) 간에는 유의적인 차이가 없었다($P > 0.05$; 그림 3). 공기교환율의 증가는 액체-기체 접촉률을 감소시켰으며(그림 3), 이는 커튼 내부에 살포된 안개분무와 공기 중 암모니아의 접촉률을 감소시켜 암모니아 저감 효과를 반감시키는 요인이다(van der Heyden *et al.*, 2015). 특

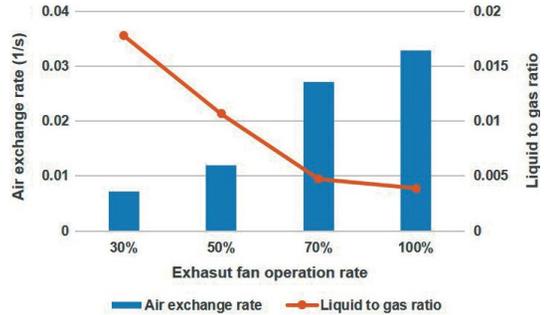


Fig. 3. Air exchange rate of air discharged through curtain and liquid to gas ratio calculated using the ventilation rate and spraying amount inside the curtain based on the exhaust fan operation rate.

히 암모니아는 확산능이 강하고 물에 대한 용해도가 높은 물질로 액체-기체 접촉률에 큰 영향을 받는다 (Morral *et al.*, 2021).

3.2 안개분무 조건별 암모니아 농도 변화

암모니아 농도는 커튼 내부에 안개분무가 가동되는 상태에서 돈사 환기팬 가동률에 따라 돈사 환기팬(돈사 배출 공기)과 커튼 외부(커튼 외부로 배출되는 공기)에서 측정하였다. 안개분무 조건은 분무 시간을 10분으로 고정하고, 휴지 시간(안개분무 미가동)을 30분과 60분으로 설정하여, 1회 분무 사이클이 총 40분(10분 분무, 30분 휴지)과 총 70분(10분 분무, 60분 휴지)으로 안개분무를 실시하였다. 분무 사이클 40분 조건에서, 돈사 환기팬의 암모니아 농도는 환기팬 가동률 30% ($0.27 \text{ m}^3/\text{s}$), 50% ($0.45 \text{ m}^3/\text{s}$), 70% ($1.03 \text{ m}^3/\text{s}$) 순으로 낮았으며, 70%와 100% 간에는 유의적인 차이가 없었다($P > 0.05$; 그림 4). 환기팬 가동률이 증가하면 환기량이 많아지고, 돈사 내·외부의 공기교환율이 증가한다. 이때 돈사 외부 공기가 강한 속도로 내부에 유입되어 돈사 내부의 암모니아를 희석시키고, 신속히 외부로 배출함으로써 돈사 내부의 암모니아 농도가 낮아진 것이다(Zong *et al.*, 2015). 커튼 외부의 암모니아 농도는 돈사 환기팬의 암모니아 농도와 달리 모든 환기팬 가동률에서 유사하였다(그림 4). 그 이유는 환기팬 가동률에 따른 공기 배출 특성에 영향을 받

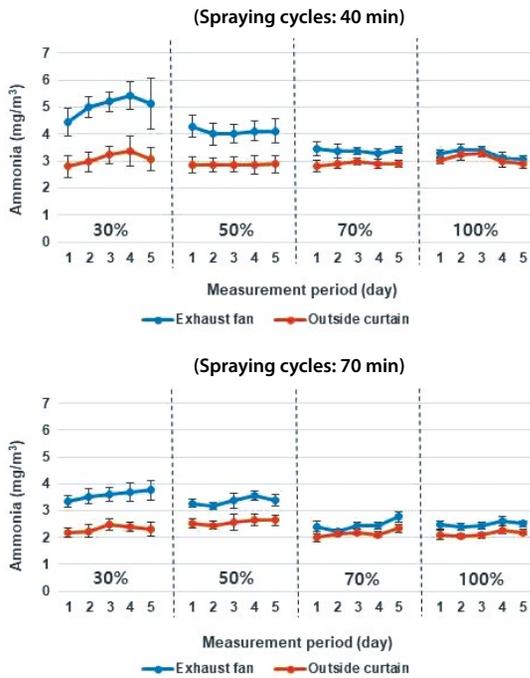


Fig. 4. Ammonia concentrations measured for 5 days according to the exhaust fan operation rates (30%, 50%, 70%, 100%) under each spraying conditions. There were spraying cycles of 40 min, consisting of 10 min of spraying and 30 min of pausing, while spraying cycles of 70 min consisted of 10 min of spraying and 60 min of pausing. The spraying and pausing intervals were systematically repeated throughout the experiment.

았기 때문이다. 높은 환기팬 가동률(70%, 100%)에서는 공기가 신속히 배출되지만, 낮은 환기팬 가동률(30%, 50%)에서는 돈사에서 배출된 공기가 커튼 내부에 정체되어 외부로 확산되지 못하였다. 따라서 커튼 외부에서 측정된 암모니아 농도는 환기팬 가동률에 관계없이 유사한 수준을 나타낸 것이다. 분무 사이클 70분 조건에서도 돈사 환기팬과 커튼 외부에서 측정된 암모니아 농도 변화 경향은 분무 사이클 40분과 유사하였다. 다만, 환기팬 가동률 30% (0.27 m³/s)와 50% (0.45 m³/s)에 비해 70% (1.03 m³/s)와 100% (1.24 m³/s)에서 암모니아 농도가 낮은 경향을 보였으나, 그 차이는 0.5 mg/m³ 이하로 미미하였다(그림 4).

다음으로 안개분무 조건 간에 암모니아 농도를 비교하였다. 분무 사이클 40분에서 돈사 환기팬과 커튼

외부의 암모니아 농도는 분무 사이클 70분에 비해 높았다(그림 4). 암모니아 농도 차이는 시험 당시 돈사 내부 온도에 영향을 받은 것으로 보인다. 분무 사이클 40분(28°C)일 때 돈사 내부 온도는 분무 사이클 70분(25°C)에 비해 약 3°C 높았다. 암모니아는 urea(질소 성분)가 urease에 의해 분해되는 미생물 활동 기반의 효소 반응으로 생성된다. 그리고 슬러리 내 질소 성분이 미생물에 의해 분해되어 암모니아성 질소(Ammoniacal nitrogen)로 전환된 후 암모니아로 휘산된다(Bierg *et al.*, 2019; Monteny *et al.*, 2006). 이때 슬러리 pH 7 이상의 약염기 상태에서 온도가 높아지면, 돈사 내부 기체 확산능의 증가로 인해 암모니아 휘산이 증가하게 된다(Kupper *et al.*, 2020; Rong *et al.*, 2009). 온도 증가로 인해 암모니아 농도가 높아지면 저감 효과에 영향을 줄 것이라 예상할 수 있다. 그래서 분무 사이클 간에 암모니아 농도 차이가 가장 큰 시험 일인 환기팬 가동률 30%의 4일차 암모니아 농도를 이용하여 분무 사이클 40분과 70분의 암모니아 저감률을 비교하였다. 암모니아 저감률은 분무 사이클 40분에서는 38.24% (돈사 환기팬 5.44 mg/m³, 커튼 외부 3.36 mg/m³), 70분에서는 35.14% (돈사 환기팬 3.70 mg/m³, 커튼 외부 2.40 mg/m³)로 분무 사이클 간 암모니아 농도는 유의미한 차이가 있으나, 암모니아 저감률은 3.10% 차이에 불과하였다. 이는 암모니아 농도의 증가가 저감 효과에 영향을 미치지 않았음을 보여주었다.

3.3 안개분무 조건에 따른 암모니아 배출 저감률

암모니아 배출 저감률은 먼저 그림 4에서 제시한 각 환기팬 가동률별로 5일 동안 측정된 암모니아 농도에 환기량을 곱하여 암모니아 배출량을 계산하였다. 환기량은 연구 방법의 2.2 풍속 및 암모니아 농도 측정에서 정리한 돈사 환기량을 이용하였다. 각 환기팬 가동률별로 5일 동안의 암모니아 배출량은 평균값을 계산하여 표 1에 제시하였고, 돈사 환기팬과 커튼 외부의 암모니아 배출량 차이를 계산하여 암모니아 배출 저감률을 산정하였다(표 1). 분무 사이클 40분에서 암모니아 배출량은 환기팬 가동률이 증가함에 따

Table 1. Emission rate of ammonia according to the exhaust fan operation rate under different spraying conditions.

Ex-oper (Ven-rate)	Spraying cycles 40 min			Spraying cycles 70 min		
	Ex-fan	Out-curt	Red	Ex-fan	Out-curt	Red
30% (0.27 m ³ /s)	1.37 ± 0.09	0.84 ± 0.05	38.69	0.98 ± 0.04	0.63 ± 0.03	35.17
50% (0.45 m ³ /s)	1.86 ± 0.05	1.30 ± 0.01	30.11	1.52 ± 0.06	1.17 ± 0.03	23.03
70% (1.03 m ³ /s)	3.46 ± 0.07	2.97 ± 0.06	14.16	2.51 ± 0.18	2.21 ± 0.10	11.95
100% (1.24 m ³ /s)	4.05 ± 0.19	3.82 ± 0.18	5.68	3.09 ± 0.09	2.66 ± 0.10	13.92

Abbreviations and units: Emission rate unit, mg/s; Ex-oper, Exhaust fan operation rate; Ven-rate, Ventilation rate; Ex-fan, Exhaust fan; Out-curt, Outside the curtain; Red, Reduction rate of ammonia emission rate; Red unit, %; Ex-fan and Out-curt are the positions the ammonia was measured.

라 높아졌으며, 암모니아 배출 저감률은 38.69%, 30.11%, 14.16%, 5.68%로 환기팬 가동률 증가에 따라 단계적으로 낮아졌다. 분무 사이클 70분에서도 암모니아 배출 저감률은 35.71%, 23.03%, 11.95%, 13.92%로 환기팬 가동률 증가에 따라 점차 낮아졌다. 암모니아 배출 저감률이 환기팬 가동률 증가에 따라 낮아진 것은 결과 및 고찰의 3.1 커튼의 공기교환율 및 액체-기체 접촉률에서 기술한 공기교환율에 따른 액체-기체 접촉률과 관련된다. 환기팬 가동률이 증가하면 공기교환율이 높아져, 돈사 배출 공기 중의 암모니아가 커튼 내부의 안개분무와 접촉하는 시간이 줄고 접촉률도 낮아진다. 그 결과, 암모니아 배출 저감 효과가 감소하였다. 반대로 환기팬 가동률이 낮으면 암모니아와 안개분무의 접촉시간이 길어져 저감 효과가 증가하였다.

그리고 안개분무 조건 간에 암모니아 배출 저감률을 비교하였다. 가장 높은 환기팬 가동률(100%)을 제외하고, 분무 사이클 70분에 비해 분무 사이클 40분에서 암모니아 배출 저감률이 높았다. 일반적으로 분무 사이클이 짧으면 암모니아와 안개분무의 접촉 빈도를 높혀 암모니아 저감 효과가 향상된다. 커튼과 유사한 원리인 물 세정 방식의 습식 세정식 탈취장치(스크러버)는 커튼보다 더 지속적으로 수돗물을 살포하여 암모니아 배출 저감률이 70% 이상이다(Mosquera *et al.*, 2014; Philippe *et al.*, 2012; Osada *et al.*, 1998). 친수성

Table 2. Compositions of the tap water and wastewater collected inside the curtain.

	pH	EC	Salt	TKN	TAN	NO ₃
Tap water	7.44	113.80	0.01	0.00	0.00	1.97
Waste water	7.39	646.33	0.03	0.01	32.07	0.00

Abbreviations and units of concentrations: EC, Electrical conductivity, μ S/cm; Salt, %; TKN, Total Kjeldahl nitrogen, %; TAN, Total ammoniacal nitrogen, mg/L; NO₃, Nitrate, mg/L

인 암모니아는 잦은 안개분무 시 저감 효과가 높아짐을 의미하였다. 안개분무액 내 암모니아 용해에 대해서는 커튼 내부에서 채취한 안개분무액의 이화학적 성분 분석 결과에서 확인할 수 있었다(표 2). 안개분무액의 전기전도도와 암모니아성 질소 농도는 안개분무를 하기 전인 수돗물(Tap water)에 비해 각각 82.39%와 100% 높았다. 이는 커튼 내부에 살포된 안개분무액이 돈사 배출 공기 중의 암모니아를 용해하면서, 암모니아성 질소 농도가 안개분무 전인 수돗물에 비해 100% 증가된 것이다. 안개분무 빈도가 높아진다면, 암모니아 저감 효과는 더 향상될 것이다. 그러나 환기팬 가동률 100%에서는 커튼 내부에 살포된 안개분무가 커튼 표면 틈새로 배출되었고, 이 현상은 분무 사이클 40분에서 더 자주 발생되었다. 커튼 외부로 배출된 안개분무는 커튼 표면에 설치된 암모니아 측정용 공기주입관으로 유입되어 암모니아 농도를 증가시키는 원인이 될 수 있다. 환기팬 가동률 100%에서 암모니아

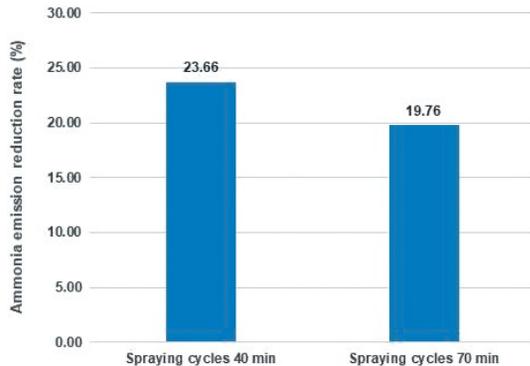


Fig. 5. Emission reduction rate of ammonia according to the spraying conditions.

배출 저감률이 분무 사이클 70분에 비해 40분에서 낮아진 원인으로 추측되었다.

측정 오류 가능성이 있는 환기팬 가동률 100%의 결과를 제외하고, 안개분무 조건별로 모든 환기팬 가동률의 암모니아 배출 저감률을 평균하여 그림 5에 도식화하였다. 암모니아 배출 저감률은 분무 사이클 70분(19.76%)에 비해 분무 사이클 40분(23.66%)에서 약 3.90% 높았으며, 이는 분무 사이클을 30분 단축(안개분무 횟수의 2배 증가) 시 암모니아 배출량을 3.90% 더 낮출 수 있음을 의미하였다.

4. 결 론

본 연구는 암모니아 배출량 관점에서 커튼 내부의 안개분무 조건별로 돈사 환기팬 가동률(30%, 50%, 70%, 100%)에 따른 암모니아 배출 저감 효과를 평가하였다. 안개분무 조건은 1회 분무 사이클이 총 40분(10분 분무, 30분 휴지)과 총 70분(10분 분무, 60분 휴지)으로 설정하였다. 연구 결과, 암모니아 배출 저감률은 안개분무 조건 모두에서 돈사 환기팬 가동률 증가에 따라 단계적으로 낮아졌다. 그 이유는 환기팬 가동률 증가에 따라 높아진 공기교환율로 인해, 돈사 배출 공기 중의 암모니아와 커튼 내부 안개분무의 접촉률이 감소하였기 때문이다. 그리고 안개분무 조건 간에

암모니아 배출 저감률은 분무 사이클 70분(19.76%)에 비해 분무 사이클 40분(23.66%)에서 약 3.90% 높았다. 즉, 돼지 사육농가에서도 분무 사이클을 30분 단축하면(안개분무 횟수 2배 증가) 암모니아 배출 저감 효과를 3.90% 향상시킬 수 있을 것이다. 다만, 본 연구는 환경 변수를 제어할 수 있는 연구용 돈사에서 진행되어, 실제 돼지 사육농가에 적용 결과와 차이가 있을 수 있다. 또한 농가에서 쉽게 활용할 수 있는 안개분무 사이클만 평가하였다. 향후, 현장 실증 연구를 통해 암모니아 저감 효과를 검증하고, 안개분무 노즐 사양(규격, 개수) 및 살포량과 같은 운영 조건의 최적화를 위한 추가 연구를 통해 실용적인 바이오커튼 사용법에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(PJ016019)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Air Management Practices Assessment Tool (AMPAT) (2014) Animal house-barriers overview. <https://www.extension.iastate.edu/> (accessed on Nov. 01, 2024).
- Bjerg, B.S., Demeyer, P., Hoyaux, J., Didara, M., Grnroos, J., Hassouna, M., Amon, B., Bartzanas, T., Sandor, R., Fogarty, M.P., Klas, S., Schiavon, S., Juskiene, V., Kjosevski, M., Attard, G., Aarnink, A.J.A., Ozkan, S., Kuczynski, T., Fangueiro, D., Marin, M.P. (2019) Review of legal requirements on ammonia and greenhouse gases emissions from animal production buildings in European countries, 2019 ASABE Annual International Meeting, 1901070. <https://doi.org/10.13031/aim.201901070>
- Huang, C.H. (2005) Theoretical model of absorption of ammonia by fine water spray, *Environmental Engineering Science*, 22(4), 535-541. <https://doi.org/10.1089/ees.2005.22.535>
- Hwang, O., Halder, J.N., Park, J., Seo, S., Lee, J.Y. (2024) Odor reduction efficiency through exhaust fan operating rate with spraying inside Bio-curtain, *Journal of Odor and*

- Indoor Environment, 23(1), 21-27, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2024.23.1.21>
- Hwang, O., Halder, J.N., Park, S., Park, J., Yang, B. (2023) Evaluation of Bio-curtain efficiency through real-time ammonia measurement, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 22(1), 1-9, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2023.22.1.1>
- Kupper, T., Hani, C., Neftel, A., Kincaid, C., Buhler, M., Amon, B., VanderZaag, A. (2020) Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - A review, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 300(2020), 106963. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963>
- Livestock Environmental Management Institute (LEMI) (2022) The final report on analysis of the results of the livestock environment survey by region. <https://www.lemi.or.kr/> (accessed on Mar. 30, 2024).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (2024) Livestock manure treatment support project (livestock odor improvement). <https://www.uni.agrix.go.kr/> (accessed on Nov. 01, 2024).
- Ministry of Environment (MOE) (2023) Livestock odor complaints. <https://www.me.or.kr/> (accessed on Jun. 01, 2024).
- Monteny, G.-J., Bannink, A., Chadwick, D. (2006) Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 112(2-3), 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.015>
- Morral, E., Gabriel, D., Dorado, A.D., Gamisans, X. (2021) A review of biotechnologies for the abatement of ammonia emissions, *Chemosphere*, 273(2021), 128606, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128606>
- Mosquera, J., Edouard, N., Guizoui, F., Melse, R.W., Riis, A.L., Sommer, S., Brusselman, E., Polusen, P.H.B., Peters, K. (2014) Decision document on the revision of the VERA protocol on air cleaning technologies. Measuring techniques for the determination of the removal efficiency for ammonia, Report 767, Wageningen UR, the Netherlands: Livestock Research.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2023) National air pollutants emission report. <https://www.air.go.kr/> (accessed on Nov. 01, 2024).
- National Law Information Center (NLIC) (2021) Enforcement Decree of the Livestock Act, Livestock industry licensing and registration requirements (related to article 14 paragraph 2, article 14-2 paragraph 2). <https://www.law.go.kr/> (accessed on Nov. 01, 2024).
- National Law Information Center (NLIC) (2023) Water quality pollution process test standards. <https://www.law.go.kr/> (accessed on Nov. 01, 2024).
- Osada, T., Rom, H.B., Dahl, P. (1998) Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection, *Transactions of ASABE*, 41(4), 1109-1114. <https://doi.org/10.13031/2013.17256>
- Philippe, F.X., Laitat, M., Nicks, B., Cabaraux, J.F. (2012) Ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs kept on two types of straw floor, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 150(15), 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.006>
- Rong, L., Nielsen, P.V., Zhang, G. (2009) Effects of airflow and liquid temperature on ammonia mass transfer above an emission surface: experimental study on emission rate, *Bioresource Technology*, 100(20), 4654-4661. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.003>
- Rural Development Administration (RDA) (2020) Study on swine farm odor emission characteristics and reduction technology final report.
- SAS (2016) SAS Enterprise Guide version 9.2. SAS Institute Inc. USA.
- van der Heyden, C., Demeyer, P., Volcke, E.I.P. (2015) Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: State-of-the-art and perspectives, *Biosystems Engineer*, 134(2015), 74-93. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.002>
- Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production (VERA) (2018) VERA Test Protocol for Air Cleaning Technologies. Version 2:2018-09.
- Zong, C., Li, H., Zhang, G. (2015) Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 208(2015), 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.031>

Authors Information

- 황옥화 (농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 연구사)
(hoh1027@korea.kr)
- 이연아 (농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 전문연구원)
(dusdk@korea.kr)
- 박준수 (농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 연구사)
(karmon2@korea.kr)
- 서시영 (농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 연구사)
(seosi@korea.kr)
- 우샘이 (농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 연구사)
(znf12345@korea.kr)
- 이준엽 (농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 연구관)
(andrewlee@korea.kr)