



압력손실을 고려한 양돈시설의 반폐회로 환기시스템의 환기량 및 혼합비율 평가

Evaluation of Ventilation Rate and External Air Mixing Ratio in Semi-closed Loop Ventilation System of Pig House Considering Pressure Loss

박유미^a · 김락우^{b,c,†} · 김준규^d
Park You-me · Kim Rack-woo · Kim Jun-gyu

ABSTRACT

The increase in the rearing intensity of pigs has caused deterioration in the pig house's internal environment such as temperature, humidity, ammonia gas, and so on. Traditionally, the widely used method to control the internal environment was through the manipulation of the ventilation system. However, the conventional ventilation system had a limitation to control the internal environment, prevent livestock disease, save energy, and reduce odor emission. To overcome this problem, the air-recirculated ventilation system was suggested. This system has a semi-closed loop ventilation type. For designing this system, it was essential to evaluate the ventilation rates considering the pressure loss of ducts. Therefore, in this study, pressure loss calculation and experiment were conducted for the quantitative ventilation design of a semi-closed loop system. The results of the experiment showed that the inlet through which external air flows should always be opened. In addition, it was also found that for the optimum design of the semi-closed loop ventilation system, it was appropriate to install a damper or a backflow prevention device rather than a ventilation fan.

Keywords: External air mixing ratio; piglet house; pressure loss; semi-closed loop ventilation system

1. 서론

국내 축산업 생산액은 매년 꾸준히 증가하여, 전체 농업생산액의 40.6%를 차지하고 있으며, 이 중에서도 양돈산업은 가장 높은 비중을 차지하고 있다 (Statistics Korea, 2021). 양돈농가의 생산량을 증가시키기 위하여, 시설의 규모는 대형화되고 있으며, 밀집사육이 이루어지고 있다. 그러나 시설의 규모가 커지고, 내부 가축수가 많을수록 시설 내부의 환경은 열악해질 수 있다. 내부 환경 (온도, 습도, 암모니아 가스 등)이 열악해지면, 돼지의 사료효율 및 증체량이 떨어질 수 있으며, 면역력이 약해져 질병에 취약해질 수 있다. 이러한 시설의 내부 환경은 공기의 흐름에 의하여 거동 및 분포가 나타나기

때문에 대부분의 양돈 시설에서는 환기를 통하여 내부 환경을 조절한다. 그러나 겨울철에는 내부 습도, 유해가스, 악취 등 열악한 공기를 배출시키기 위하여 환기를 시킬 경우, 차가운 공기가 유입되어 저온 스트레스가 발생할 수 있다. 또한, 돈사 내·외부 질병 발생 및 전파의 문제로 인해 환기를 원활하게 시키기에는 많은 어려움이 있다.

겨울철 돈사 내부의 열에너지를 최대한 활용하고, 돈사 내·외부 질병을 차단하기 위하여 고안된 방법으로 공기 재순환 시스템이 있다. 공기 재순환 시스템은 내부에서 배출되는 공기를 세정 및 살균하여 다시 재이용하는 것에서 착안되었다. 이러한 공기 재순환 기술은 주로 산업환경에서 건물 내부 공기 에너지를 유지하여 냉·난방비용을 절약하기 위해 연구되고 있다 (Ekinci et al., 2006; Park and Seo, 2018; Zhang et al., 2016; Ziegler et al., 2016). 돈사에 공기 재순환 기술을 접목하면, 돈사 내부의 공기를 일부 재이용하여 외부 공기의 유입을 최소화하고 환기량을 증가시킴으로써 청결한 돈사 내부 환경을 유지할 수 있으며 동시에 질병 전파를 차단할 수 있다. 또한, 겨울철 축사 내부 환기량을 증가시킴에 따라 사육환경을 개선할 수 있으며, 부수적으로 축산 악취 배출을 최소화하고 공기의 재유입을 통하여 에너지 부하를 절감할 수 있다. 이에 따라, 공기 재순환 기술을 돈사에 접목한 연구가 다양하게 수행되고 있다 (Alvaredo and Predicala, 2017; Anthony et al., 2014, 2015, 2017; Cortus et al., 2010; Park et

^a MS Student, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

^b Assistant Professor, Department of Smart Farm Engineering, College of Industrial Sciences, Kongju National University

^c Chief Researcher, Industrial Development Institute, Kongju National University

^d Ph.D. Student, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: ***-****-****

E-mail: rwkim@kongju.ac.kr

Received: October 19, 2022

Revised: November 10, 2022

Accepted: November 14, 2022

al., 2017; Peters et al., 2015). Anthony et al. (2015; 2017)은 분만 돈사에 공기 재순환 시스템을 적용하였을 때 돈사 내부의 분진 및 이산화탄소 농도를 분석하였으며, 공기 재순환 시스템이 근로자의 건강 저하를 막을 수 있는 대안이라고 보고하였다. 한편, Kim et al. (2022a, 2022b)은 에너지 비용, 약취 배출, 양돈 생산성 등의 문제를 해결하고자 공기 재순환 기술을 개발하였다. 이러한 기술 개발을 위하여 현장자료를 수집하여 분석하였으며 공기역학 해석을 위해 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics)모델을 개발하였다. 최종적으로 공기순환 환기시스템의 적용 가능성을 평가하였으며 환기량 정량제어를 위해서는 덕트의 압력손실이 고려되어야 한다고 밝혔다.

이러한 공기 재순환 시스템을 통하여 돈사 내부의 환기량을 증가시켜 내부 환경을 쾌적하게 유지하기 위해서는 환기구구조의 정밀한 설계가 필수적이다. 일반적인 환기 방식으로 공기를 배출시키는 것이 아니라, 공기의 유입구와 출입구가 연결되어 있기 때문에, 유출입 공기의 양이 정확하게 제어되지 않으면, 환기 운영에 문제가 발생할 수 있다. 재순환시스템의 압력 부하를 고려하지 않고 공기를 재순환 시킬 경우, 돈사 공기의 배출량보다 유입량이 작게 나올 수 있다. 이러한 경우, 돈방 내부가 음압이 걸리기 때문에, 환기팬에 부하가 걸리거나, 불필요한 유입구를 통하여 침기가 발생하면 원활한 돈사 내부 환경 조절이 어려워질 수 있다. 따라서, 공기 재순환시스템의 적정 환기 운영을 위해서는, 재순환 공기 흐름의 정확한 평가와 압력부하를 고려한 설계가 이루어져야 한다 (Choi and Lee, 2012; Fan et al., 2013; Oh et al., 2019; Terkildsen and Svendsen 2013; Zmrhal and Bohac, 2021). 덕트의 압력부하는 대형, 초고층건물에 에너지 절약을 위해 사용되는 공기분배 시스템에서도 매우 중요한 부분이다. 건축물의 대형화 및 고층화로 인하여 한 건물 내에서 특성이 다른 다양한 영역들로 나누어지게 되었으며, 각각의 특성에 맞게 실내의 온도, 습도를 제어하기 위해서는 부하 계산이 필수적이며 특히, 주덕트

의 압력부하 계산이 필수적이다. (Gwon, 2008)은 압력부하를 고려하지 않고 환기시스템 설계를 하는 경우, 외기 도입량이 일정하게 유지되지 않아 환기량 부족 현상을 초래할 수 있다. 따라서 건물 내부 청정도가 열악해지고, 적은 풍량 공급으로 인해 실내공기의 유인효과가 감소하게 되어 콜드 드래프트를 야기하는 등 다양한 문제가 발생할 수 있으므로, 환기설비 시스템을 구상할 때 압력부하를 고려하여 외기도입량을 항상 일정하게 유지하는 것은 필수적이며, 다양한 실험 및 검증을 통하여 공기분배 시스템의 적절한 조합, 제어조건 등을 찾아야 한다고 밝혔다.

따라서, 본 연구에서는 양돈 시설에서 공기 재순환 시스템의 반폐회로 덕트시스템의 압력손실 및 실풍량을 평가하여 환기량 및 외부 공기 혼합비율 적용 시 필요한 환기팬의 종류, 대수, 위치 등의 기준을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 시설

실제 양돈장에서 환기량 및 환기구구조에 대한 실험이 제한적이기 때문에 본 실험은 실제 돈사와 동일한 형태 및 환기구구조를 가진 서울대학교 평창캠퍼스 스마트축사 공학실증센터 (AcSEC-A3EL, Artificially-controlled Smartfarm Engineering Center)에서 2021년도 8월 31일에 수행하였다. 실증센터는 양돈 축사표준설계도를 참고하여 실제 자돈방과 동일하게 설계되었으며, 폭 및 세로는 9.5 m에 6.7 m이며, 높이는 2.3 m이다. 또한, 실증센터는 돈사에서 사용하는 대표적인 환기시스템을 모두 설치하여 다양한 환기 구조에 대한 실험이 가능하다. 또한, 돼지들의 공기역학적 영향을 반영하기 위하여 모형 돼지들을 실제 사육두수와 동일하게 배치하였으며 모식도는 Fig. 1과 같다.

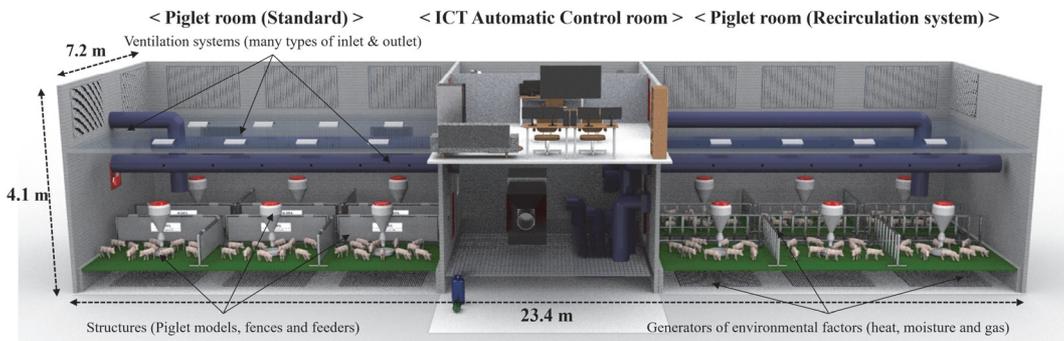


Fig. 1 Schematic view of ventilation system in pig house

국내에서 대표적으로 사용하는 표준축사의 환기시스템은 환기팬을 통해 외부로 공기를 배출시키며, 측벽슬랏, 중천장 슬랏 등 다양한 입기 구조를 통하여 유입되는 방식이다. 그러나 기존의 표준축사 형태에서 공기 재순환을 적용하였을 경우, [Fig. 3]과 같이 팬 #1에서 배출되는 공기가 세정기를 통과하여 깨끗하게 세정되고, 덕트를 통하여 돈사 내부로 재유입된다. 이때, 공기 세정기는 돈사로 재유입되는 공기가 돈사 내부 환경을 적절하게 유지할 수 있도록 공기질을 적정 수준으로 만드는 역할을 하며 돈사 내부의 공기질은 온도, 습도, 이산화탄소, 유해가스, 악취 등을 기준으로 평가된다. 특히, 돼지의 호흡에 의해 발생하는 이산화탄소의 경우, 공기 세정기를 이용하여 저감시키기 어렵기 때문에 반드시 외부 공기를 일부 혼합하여 적정 수준으로 유지시켜야 한다. 따라서, 공기 세정기를 통과한 공기중 일부는 댐퍼를 통과하여 외부로 배출시키고, 팬 #3을 통과하여 유입되는 공기가 중천장 내의 덕트를 통과한 외부 공기와 혼합하여 돈사 내부로 재유입 되도록 설계하였다.

2. 덕트 압력손실 계산 이론

일반적으로 덕트의 관내 압력손실은 공기와 관벽, 공기끼리의 마찰에 의하여 발생한다. 압력손실은 속도의 제곱인 속도압과 비례한다. 압력손실은 아래 식으로부터 계산된다.

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{\gamma V^2}{2g} = \zeta \cdot \frac{l}{D} \cdot P_v \quad (1)$$

여기서, ΔP 는 압력손실 (Pa), ζ 은 압력손실계수, γ 은 공기의 밀도 (kg/m^3), V 은 공기의 유속 (m/s), g 는 중력가속도 (m/s^2), P_v 은 속도압 (Pa), l 은 덕트관의 길이 (m), D 는 덕트관의 직경 (m)을 의미한다.

압력손실계수는 $\zeta = 4f$ 이며, f 는 마찰계수이다. 마찰계수는 유체흐름의 형태를 나타내는 무차원의 레이놀즈수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (2)$$

여기서, ν 는 동점성계수 (m^2/s)이다. 마찰계수는 다음과 같이 경험식에 의하여 계산이 가능하다.

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (3)$$

$$R_e \leq 10^5, f = \frac{0.3164}{R_e^{0.25}} \quad (4)$$

$$10^5 < R_e < 3 \times 10^6, f = 0.0032 + \frac{0.221}{R_e^{0.237}} \quad (5)$$

또한, 공기의 밀도, 비열, 점성계수, 동점성계수는 온도에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서 밀도, 비열, 점성계수, 동점성계수는 각각 1.166 kg/m^3 , $0.240 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, $1.86 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{sec/m}^3$, $0.156 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ 값을 사용하였다 (Moody, 1944).

3. 연구 방법

본 연구에서는 Kim et al. (2022a, 2022b)이 개발한 돈사 공기순환 환기시스템에 적용하기 위해 반폐회로 덕트시스템의 압력손실 및 실풍량을 평가하였다. 실험 순서는, Fig. 2와 같으며, 돈사의 각 모듈을 먼저 디자인 한 후, 팬의 조합에 따른 환기량 측정, 팬의 가동률에 따른 환기량을 측정하여 압력손실을 계산하였다. 이를 바탕으로 외부 공기 혼합비율을 계산하여 최적의 팬의 조합 및 설치위치 등을 제시하였다.

4. 실험 시설 및 실험 방법

본 연구에서 사용한 실험장비는 돈사의 환기팬 총 4대, 환기량을 측정하는 airflow meter 5대, 온도 보정을 위해 측정하는 돈방 내부의 온도 센서이다. 다음 Fig. 3는 환기팬의 설치 위치 및 공기의 흐름을 나타내는 모식도이며, 팬의 제원은 Table 1과 같다.

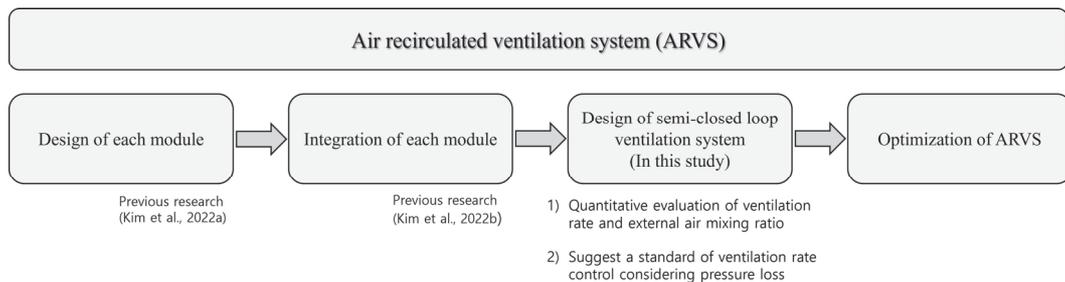


Fig. 2 Flow chart for this study

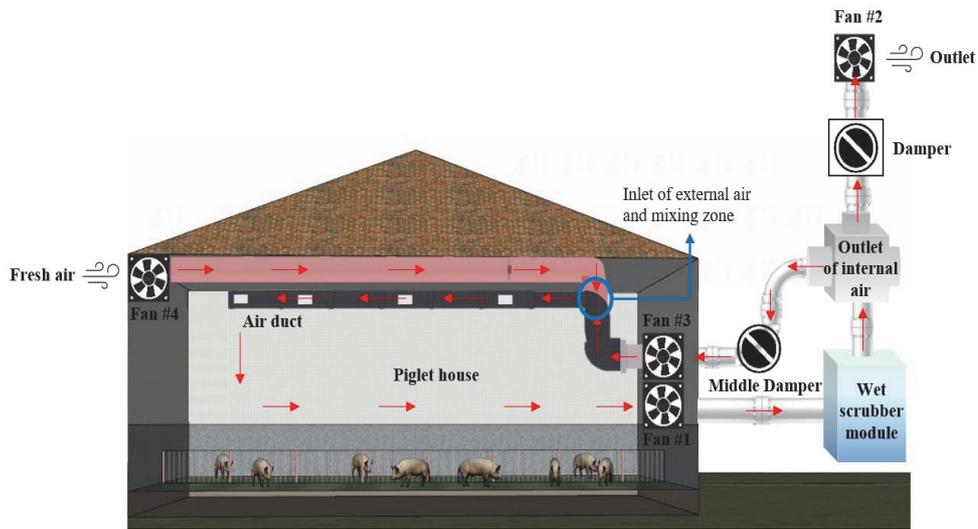


Fig. 3 Airflow diagram of recirculation ventilation system

Table 1 Ventilation fan types and specification

Fan number	Fan model (Manufacturer)	Power	maximum air volume (CMM)	Figure
#1	COCO-550A (DONGSUNG COCOFAN)	220 V 60 Hz	100	
#2	TFB-F30-FS (Fanzic)	220 V 60 Hz	100	
#3	TFP-F30 BSE (Fanzic)	220 V 60 Hz	30	
#4	DLF-350 (DAELIM ENERGY)	220 V 60 Hz	30	

여기서, 팬 #1과 팬 # 3은 공기순환 제어를 위하여 설치되었으며, 팬 #2와 댐퍼는 외기혼합비를 제어하기 위하여 설치하였고, 팬 #4는 공기 입기를 위하여 설치하였다.

환기량 제어를 위하여 팬 #1, 팬 #2의 최대 풍량이 동일한 제품으로 선정하였으며, 덕트 구조 및 설치 위치에 따라 팬의 형상은 Table 1과 같이 사용되었다. 실험을 위하여 원형 덕트를 사용하였기 때문에, 설치되는 형상에 따라 환기팬의 프레임 입과 직경을 고려하여 환기팬의 형상을 선정하였다. 환기량 제어는 환기팬의 전압을 변압기를 이용하여 제어하였으며, 전압값에 따른 환기량을 측정하여, 실험 조건에 적용하였다. 실험 조건을 위한 환기량 측정시에는 반폐회로 구성을 하지 않고, 팬 자체의 고유 풍량이 측정되도록 설계하여 적용하였다. 본 연구에서는 모든 실험조건에서 설정 전압을 동일하게 적용하였으나 만약, 실증능가에 적용하여 제어를 할 경우, 내부 덕트 및 구조물의 형상에 따라 팬에 걸리는 팬부하가 다르게 작용하기 때문에 반드시 제어 전압에 따른 토출풍량의 기준값을 재설정하여 교정하는 과정이 필요하다는 사실을 확인하였다.

각 배출 덕트 관내에서 압력손실이 발생하는 영역에 앞뒤로 풍량 측정장치를 설치하여, 실제 풍량 및 손실량을 계산하였으며, 압력 측정장치 및 미세차압 변환기를 사용하여 환기량 및 외부공기 혼합비율을 측정하였다. 풍량 측정원리는 평균 피토크관을 설치하여, 전압과 정압을 측정하는 방식을 이용하였다.

차압을 이용한 유량 측정 원리는 베르누이 방정식에 의하여 계산되며, 원리는 다음과 같다. 정압 (Static Pressure)은 배관 내 정체되어있는 고유 압력이며, 동압 (Dynamic Pressure)은 배관 내 흐름이 발생할 때 생기는 순수 압력이고, 전압 (Total Pressure)은 정압과 동압의 합이다. 따라서, 평균 피토크관

에서 측정되는 전압과 정압의 차이를 이용하여 동압을 측정하며 동압으로부터 관내 유속을 산정하여 유량을 환산하여 계산하였다. 베르누이 방정식은 다음 식 (6)과 같다.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (6)$$

여기서, P 는 압력 (Pa), ρ 는 유체의 밀도 (kg/m^3), g 는 중력 가속도 (m/s^2), v 는 유체의 속도 (m/s), z 는 위치수두이다. 여기서, 관내 흐름에서는 높이차가 발생하지 않기 때문에 $z_1 = z_2$ 이다. 따라서, 동압을 이용하여 다음과 같이 관내 유속을 산정할 수 있다.

$$v = c_p \times c_t \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (7)$$

여기서, c_p 는 피토크관 계수이며, 실험장비의 피토크관 계수는 0.785이다. c_t 는 온도 보정계수로, 공기의 온도 T (°C)에 따른 값으로 계산할 수 있다.

$$c_t = \frac{273 + T}{273} \quad (8)$$

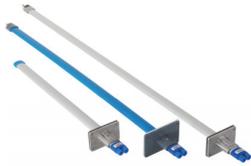
실험에 사용한 장비의 재원은 Table 2와 같다.

5. 실험 절차

공기 재순환시스템의 풍량 측정 위치는 Fig. 4와 같다.

각 측정 위치에서 수집되는 전압과 정압의 데이터를 이용하여, 동압 및 풍량을 산정하였다. 압력손실은 팬 #1로부터 배출되는 공기가 공기 세정장치, 덕트 등을 통과하면서 발생

Table 2 Specifications of airflow measuring equipment

Airflow measuring equipment	Model (Manufacturer)	Specifications	Figure
Averaging Pitot Tube	AFM-P (Flossen, USA)	Wind speed range : 1.5 m/s~25 m/s Probe length : 200 mm~600 mm	
Differential Pressure Transmitter	DPT-R8 (Air Flow Tech, USA)	Output : 0 mA-20 mA Measurement ranges 0 Pa~250 Pa	

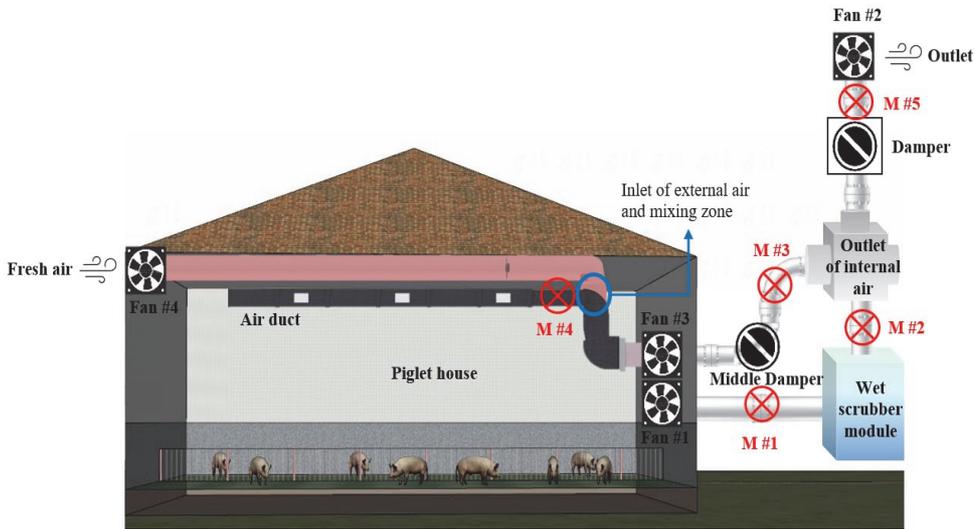


Fig. 4 Air volume measurement location of air recirculation system

Table 3 Experimental conditions to evaluate the ventilation rate and external air mixing ratio according to the fan combination

Fan combination	Standard ventilation	External air mixing ratio (%)
F#1 + F#2	Required ventilation rate for pig nursery $100 \text{ CMM} (0.4 \cdot \text{min}^{-1})$ - Minimum ventilation rate in piglets nursery -	100
F#1 + F#3		80
F#1 + F#2 + F#3		60
F#1 + F#2 + F#3 + F#4		40
		20
		0

하는 마찰에 영향을 받는다. 돈방 내부에서 배출되는 공기의 양과 유입되는 공기의 양의 차이를 줄이기 위하여 팬 #3을 가동하였다. 따라서, M #1과 M #4 위치에서의 동압의 차이를 통하여 해당 구간에서 발생하는 압력손실을 추정하였다.

먼저, 돈사 내부의 환기량을 결정하는 팬은 팬 #1이다. 또한, 외부 공기 혼합비율을 제어하는 팬은 팬 #2이기 때문에, 정량적인 혼합비율을 산정하기 위하여 팬 #1과 팬 #2의 조합에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 덕트의 마찰손실량을 산정하여 이를 해결하기 위한 추가 팬으로 팬 #3이 사용되었으며, 이에 대한 평가를 위하여 팬 #1과 팬 #3에 대한 조합으로 실험을 수행하였다. 외부공기 혼합비율 및 마찰손실을 모두 고려한 팬 #1, #2, #3에 대한 실험을 수행하였으며, 마지막으로 외부 공기혼합비율을 제어하는 팬 #2에 의하여 배출되는 공기의 양만큼 유입되는 구간에서 추가 환기팬이 필요한지 평가하기 위하여 팬 #4에 대한 실험을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 팬 #1 & 팬 #3 조합에 따른 덕트 손실 계산

대상 실험 자돈방의 규모는 180두의 자돈이 사육되는 기준으로 설계되었기 때문에, 돈사 환기팬 #1의 가동조건을 180두의 자돈이 사육된다고 가정하여, 이에 따른 필요환기량과 동일하게 설정하였고, 외부 공기 혼합을 하지 않고 모든 공기를 재순환하기 위하여 팬 #2를 가동하지 않고, 댐퍼를 폐쇄한 상태로 풍량을 측정하였다. 이때, 환기팬 #1로부터 돈사 내부로 유입되기까지의 총 손실 유량을 계산하기 위하여, 측정위치 #1과 #4의 차압을 통하여 손실압력을 계산하였다. 또한, 덕트의 관마찰 손실을 계산하여 이와 비교분석을 하였다. Fig. 5와 같이 팬 #3의 가동조건에 따른 마찰손실 측정 및 계산 결과를 도시하였으며, 측정 데이터는 Table 4와 같다.

팬 #3을 가동하지 않은 조건에서는 공기 재순환 시스템은 팬 #1의 동력에 의해서만 이루어지며, 팬 #2를 가동하지 않고 댐퍼를 폐쇄하였기 때문에 측정위치 M #5의 풍량은 측정하지 않았다. 이러한 조건에서 M #1과 M #4의 측정 동압의 차이는

마찰손실에 의한 압력 저하로 간주할 수 있다. 압력 저하는 26.50 Pa로 측정되었으며, 덕트손실 계산에 따른 손실압력은 25.05 Pa로 유사하게 도출되었다. 덕트의 마찰손실 계산에서 주요 변수는 관의 길이와 관내 유속이며 모든 케이스 조건에서 덕트관 길이는 동일하기 때문에 관내 동압에 비례하는 것을 알 수 있다. 한편 돈방에서 배출되는 동압 (M #1)에 비하여 유입되는 공기의 동압 (M #4)은 배출 동압의 약 48%를 차지하였다. 그러나 Kirchhoff의 제 1법칙에 의하면 돈사 내부의 유입 유량과 유출 유량이 같아야하기 때문에, 유입되는 공기의 유량이 더 작다는 것은 실제 팬의 압력에 비하여 원하는 환기량만큼 운영되지 못하거나, 침기에 의하여 외부 공기가 유입되는 것으로 예상할 수 있다. 실제 양돈 시설은 완벽하게 기밀성을 유지하기 어렵기 때문에, 음압식 환기 방식은 침기 현상이 불가피하다. 일반적인 양돈 시설의 환기시스템은 배기팬에 의하여 시설 내부에 음압을 형성하고, 외부 대기압과의 압력차만큼 공기가 유입된다. 그러나 반폐회로 환기시스템에서는 배출팬에 의하여 형성된 압력 차이가 발생하여, 입

기구에서의 압력 차이가 대기압과의 차이가 아닌, 마찰손실이 반영된 양압의 영향을 받기 때문에 반드시 압력손실을 보강해줄 수 있는 장치가 필수적이다.

Fig. 5는 팬 #3의 가동조건에 따른 결과이며, 팬 #3을 가동하여 유입공기량을 증가시켜 덕트의 마찰손실로 인한 유량 저하를 보완하고자 하였다. 마찰손실을 보완하기 위한 팬의 직렬배치는 폐회로 시스템에서 압력 부하에 의한 팬 및 기타 장비의 고장이 발생할 수 있다. 그러나 반폐회로 시스템은 반드시 대기압과 접하는 개구부가 있기 때문에, 환기팬에 과도한 부하를 방지할 수 있다. 팬 #3의 가동조건을 50%까지 증가시키는 동안에는 압력손실의 보충이 미미하게 발생하였다. 이는 공기가 재순환하는 풍량에 비해 팬의 가동량이 작아 영향을 크게 주지 못한 것으로 사료된다. 그러나 가동조건을 60% 이상 증가시키는 경우, 두 팬의 직렬 배열에 의한 환기량 증가로 인하여 유속증가에 따른 마찰손실이 증가한 것과 동시에, 팬 #3의 압력손실 보충역할을 수행할 만큼의 풍량을 확보했다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 최대 가동률에 도달하였을 때, 압력손실량을 배출 동압의 약 12%정도로 줄일 수 있었으며 이를 바탕으로, 공기 재순환 시스템을 설계할 경우, 마찰손실에 의한 유출입 유량의 차이를 줄이기 위해서는 팬 #3위치에서 유량 보충을 실시해야할 것으로 판단된다. 또한, 본 실험 결과는 테스트베드 실험돈방에서 수행한 것이기 때문에, 추후 실제 돈사에서 측정된 결과로 팬 #3의 값을 추정하여 필요 보충량을 산정할 필요가 있다.

이후 팬 조합에 따른 환기량, 외기혼합비율 조절 실험에서 마찰손실을 배제시키기 위하여, 팬 #3의 가동조건을 100%로 설정하였다. M #2와 M #3은 환기팬 가동조건에 상관없이 유량편차는 각각 1.2, 0.9 CMM 이내로 발생하여, 유의미한 압력 손실이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 따라서, 재순환시스템에서 돈사 공기가 배출되는 댐퍼를 폐쇄하고 공기를 모두

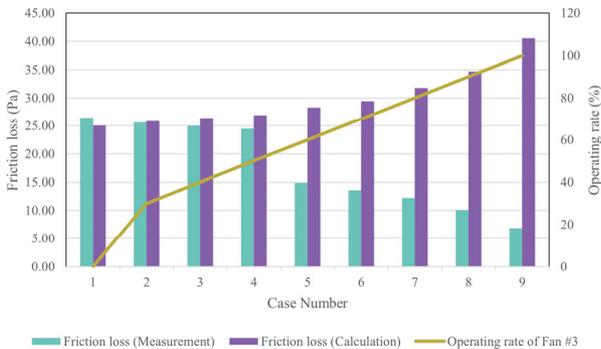


Fig. 5 Friction loss measurement and calculation results according to the operating conditions of fan #3

Table 4 Results of the measured and calculated pressure loss of ducts using fan #1 and fan #3

No.	Fan condition (%)				Ventilation rate measurement (CMM)					Load (Pa)	Pressure loss of ducts calculation		
	F #1	F #2	F #3	F #4	M #1	M #2	M #3	M #4	M #5	M #1 - M #4	Re	λ	loss (Pa)
1	100	-	0	-	100.5	61.7	61.7	52.2	0	26.50	177,609.02	0.02	25.05
2	100	-	30	-	100.5	61.7	60.2	53.0	0	25.63	180,330.99	0.02	25.83
3	100	-	40	-	100.5	62.0	61.0	53.6	0	24.98	182,372.48	0.02	26.42
4	100	-	50	-	100.5	62.1	60.4	54.1	0	24.45	184,073.71	0.02	26.91
5	100	-	60	-	91.7	61.6	61.2	55.5	0	14.88	188,837.17	0.02	28.32
6	100	-	70	-	91.2	62.8	62.5	56.6	0	13.60	192,579.89	0.02	29.46
7	100	-	80	-	91.6	64.0	62.7	58.8	0	12.22	200,065.33	0.02	31.79
8	100	-	90	-	91.2	64.4	62.8	61.4	0	10.09	208,911.75	0.02	34.66
9	100	-	100	-	91.0	64.8	61.6	66.4	0	6.87	225,924.11	0.02	40.54

돈방 내부로 유입시키는 경우, 해당 공간을 통과하는 동안에 압력손실이 크게 발생하지 않을 것으로 예상된다. M #3과 M #4의 사이에서 평균 4.7 CMM의 풍량 손실이 발생하였으나 이는 전체 시스템의 덕트 마찰에 의한 압력손실이 고려되기 때문에 해당 압력손실을 설계에 반영할 필요는 없다.

2. 팬 #1 & 팬 #2 조합에 따른 외부공기 혼합비율 계산

공기 재순환 시스템에서 팬 #2의 역할은 외부로 공기를 배출시키는 공기의 양을 조절하는 것이다. 따라서, 팬 #1의 풍량을 돈방의 적정 환기량으로 일정하게 유지한 뒤, 팬 #2의 풍량 제어 조건에 따른 외부 공기혼합비율을 산정하고자 하였다. 팬 #2의 풍량을 제어하는 동안, 댐퍼는 팬 #2를 작동시키지 않는 경우, 폐쇄시켜 공기의 흐름이 외부로 배출되지 않도록 막는 역할을 하였으며, 팬 #2의 유량을 증가시킬 때마다 개폐

율을 증가시켜 원활하게 풍량이 유지하도록 제어하였다. 또한, 외부 혼합공기 비율이 80% 이상이 되었을 때, 팬 #2의 풍량에 의하여 돈방으로 유입되는 공기가 영향을 받지 않도록, 중간 댐퍼를 닫았으며, 돈방 내부로 유입되는 공기의 경로가 외부 공기만으로 연결되도록 하였다.

Fig. 6은 팬 #2의 제어 조건에 따른 돈사 내부 외부공기 혼합비율이다. 팬 #2의 제어는 환기팬의 전력값을 변압기를 통하여 선형으로 제어하여 0~220 V로 제어하였다. 환기팬의 전력값 제어 비율과 실제 배출되는 혼합비율이 유사하게 나타났다. R²의 값이 0.93이므로 전력값 제어로 가능할 것으로 사료된다. 이는 팬 #2의 최대풍량 성능이 팬 #1과 동일하게 설치되어 있기 때문에, 최대 전력을 입력할 경우, 배출되는 공기가 모두 댐퍼를 통과하는 것으로 판단된다. 또한, 돈방 환기량 기준으로 운영되는 팬 #1의 환기량은 100.5 CMM으로 유지되었으며, 최대 100% 외부 공기를 배출시키더라도 풍량이 팬 #5에서 91.2 CMM으로 측정되는 것은 두 측정지점 사이의 압력손실로 판단된다. 한편 돈방으로 유입되는 공기의 양은 52.8 CMM으로, 압력손실에 의한 유량 손실이 발생하였다. 팬 #2의 유량이 증가하여 혼합비를 증가하여도 돈방으로 유입되는 공기는 54~57 CMM으로 소폭 증가하였으며, 시스템 부하에는 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 돈방 내부 유출입 공기의 양은 일정하게 유지되었기 때문에, 팬 #2로 배출되는 공기의 양만큼 충분히 외부 공기가 팬 #4지점에서 유입된 것을 알 수 있다. 또한, 모든 혼합비율은 실제 전력 제어값보다 낮게 산정되었으며, 특히, 팬 제어값을 100%로 가동하더라도, 실제 혼합비는 90%로 계산되었다. 이는 팬 #2 지점까지의 압력손실에 의한 것으로 판단되며, 압력손실이 팬 #3을 사용할 때보다 낮은 것은 시스템 전체보다 팬 #2까지의 덕트 길이가 더 짧기 때문인 것으로 사료된다.

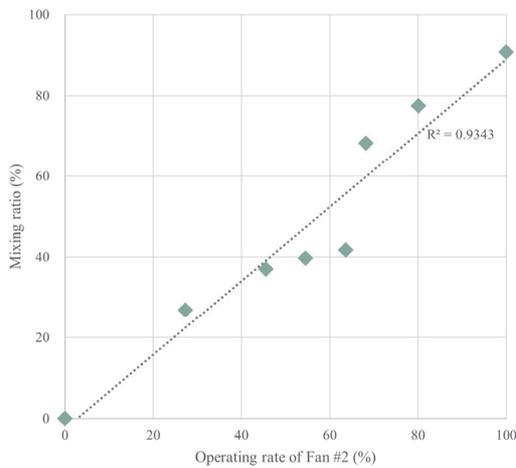


Fig. 6 External air mixing ratio according to fan #2 control condition

Table 5 Ventilation amount measurement results according to the control conditions of fan #1 and fan #2

No.	Fan condition (%)				Ventilation amount measurement (CMM)					Mixing ratio (%)	Damper open rate (%)	
	F #1	F #2	F #3	F #4	M #1	M #2	M #3	M #4	M #5		Damper	Middle damper
1	100	0.0	-	-	100.5	61.6	60.0	52.8	0.0	0	100	0
2	100	27.3	-	-	100.5	62.9	57.6	54.6	27.0	26.9	70	0
3	100	45.5	-	-	100.5	64.6	55.5	55.5	37.2	37.0	50	0
4	100	54.5	-	-	100.5	64.6	51.0	55.5	39.9	39.7	50	0
5	100	63.6	-	-	100.5	66.0	50.4	56.0	42.0	41.8	50	40
6	100	68.2	-	-	100.5	68.7	13.5	57.1	68.6	68.3	0	60
7	100	80.1	-	-	100.5	79.4	7.1	56.9	77.9	77.5	0	80
8	100	100.0	-	-	100.5	81.2	3.1	57.0	91.2	90.7	0	100

3. 팬 #1 & 팬 #2 & 팬 #3 조합에 따른 외부공기 혼합제어

공기 재순환 시스템에서 팬 #1은 돈방의 필요 환기량을 유지하는 기준 환기량으로 가동하였으며 팬 #2는 외부 공기 혼합비율을 제어하기 위하여 활용하였다. 팬 #3은 돈방으로부터 유출입되는 공기의 양을 일정하게 맞춰주기 위하여, 시스템의 압력손실을 보강하는데 활용하였다. 따라서, 3가지 팬을 모두 사용하여 덕트의 압력손실을 최소화하면서 외부공기를 혼합하는 운영 방안을 평가하고자 하였다.

공기 재순환 시스템의 압력손실을 보충하는 팬 #3의 설정 풍량은 100% 가동조건으로 고정된 뒤, 팬 #2의 제어값에 따라 각 풍량 측정 위치에서의 유량을 측정하였다. Fig. 7은 팬 #2에 따른 혼합비율 제어 결과이다. 팬 #2와 댐퍼, 중간 댐퍼를 활용하여 혼합비를 제어했을 때, 실제 M #5에서 측정되는 유량이 제어값에 잘 대응하는 우수한 결과를 나타내었다. 한

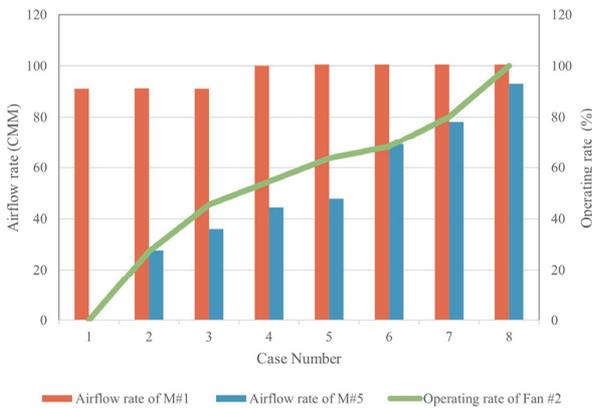


Fig. 7 External air mixing ratio according to the control condition of fan #2

편 팬 #2의 40~60% 혼합비율 범위에서의 제어값보다 실제 유량이 약 20%가량 낮게 측정되었다. 일반적인 단상의 모터 동력의 팬은 전력값을 선형으로 조절하여 제어하는 것은 권장하지 않는 방법이다. 환기팬의 입력 전력은 220 V로 일정해야 하며, 전력값에 따라 출력되는 모터의 성능은 일정하지 않을 수 있다. 따라서, 실제 농장에 적용하여 제어를 실시하는 경우, 3상의 모터를 활용하여 인버터 제어를 하는 것이 바람직하다. 본 실험에서는 환기팬의 풍량에 따라 외부 공기 혼합비율을 조절하는 것이 목적이기 때문에, 전력 제어로 평가를 수행하였다. 정밀한 환기팬의 제어를 위한 장비와 제어기의 교정은 설치 환경 및 조건에 따라가는 것이 적합한 것으로 판단된다.

팬 #3을 100% 가동조건으로 유지하여 혼합공기를 제어하는 동안, 돈방으로 유입되는 유량인 M #4에서는 유량이 일정하게 유지되었으며 팬 #2의 제어값을 조절하여 혼합비율을 바꾸더라도, 덕트의 압력손실은 평균 8.35 Pa로 유지되었다. 따라서, 환기팬의 #1, #2, #3의 조합으로 공기 재순환 시스템의 환기량 및 외부공기 혼합 제어가 충분한 것으로 사료된다.

4. 팬 #4 의 활용 평가

공기 재순환 시스템 중 팬 #2에서 배출되는 공기는 제어값에 따라 외부공기 혼합비율이 결정된다. 한편, 돈방에서 배출되는 공기의 풍량 값에서 팬 #2를 통해 외부로 배출되고 그 풍량 차이 ΔQ 가 돈방 덕트로 유입된다. 돈방에서 재유입되는 공기의 유량은 돈방에서 나오는 풍량과 동일하기 때문에, ΔQ 만큼의 공기가 복도 덕트를 통하여 유입되어야 전체 재순환시스템의 유량이 일정하게 유지될 수 있다. 따라서, 복도 덕트에서 발생하는 음압에 의한 공기 입기 과정에서 추가 동

Table 6 Results of the measured and calculated pressure loss of ducts using fan #1, fan #2, and fan #3

No.	Fan condition (%)				Ventilation amount measurement (CMM)					Mixing ratio (%)	Load (Pa) M #1 - M #4	Pressure loss of ducts calculation		
	F #1	F #2	F #3	F #4	M #1	M #2	M #3	M #4	M #5			Re	λ	loss (Pa)
1	100	0.0	100	-	91.1	63.2	63.2	64.6	0.0	0.0	7.98	219799.66	0.02	38.37
2	100	27.3	100	-	91.2	64.5	58.7	65.0	27.7	30.4	7.80	221,160.65	0.02	38.85
3	100	45.5	100	-	91.1	65.7	56.1	64.6	36.0	39.5	7.98	219,799.66	0.02	38.37
4	100	54.5	100	-	92.1	68.2	51.7	63.9	44.4	44.4	9.03	217,417.93	0.02	37.54
5	100	63.6	100	-	91.1	69.3	48.6	63.9	47.9	47.7	8.40	217,417.93	0.02	37.54
6	100	68.2	100	-	91.2	72.9	0.0	63.2	69.2	68.9	8.90	215,036.20	0.02	36.73
7	100	80.1	100	-	91.1	79.1	0.0	63.4	78.1	77.7	8.71	215,716.70	0.02	36.96
8	100	100.0	100	-	91.1	83.1	0.0	64.1	93.1	92.6	8.28	218,098.43	0.02	37.78

력팬을 가동하여, 내부 혼합비율에 영향을 끼치는지 파악하고자 하였다. 돈방 환기량을 결정하는 팬 #1은 100%로 가동하였으며, 재순환시스템의 압력손실을 보충하는 팬 #3은 100%로 가동하였고 외기 혼합비율은 50%로 고정된 뒤, 팬 #4에 의한 영향을 확인하고자 하였다. 먼저, 팬 #4의 풍량을 0%로 설정하였을 경우, 외부공기 혼합비율 및 내부 풍량은 적정 환기량 및 혼합비율을 유지하였으며, 유입공기의 압력손실은 약 7 Pa로 유지되었다. Fig. 8은 팬 #4를 제어하여, 복도 공기 유입량을 제어한 결과이다. 팬 #4의 제어 가동율을 0~100%까지 4단계로 제어를 하였지만, 공기 재순환 시스템 전체 측정 위치에서 유의미한 풍량 변화는 발생하지 않았다. 공기 재순환 회로에 존재하는 덕트관로 내에서 모든 유출입부에 환기팬이 가동하고 있기 때문에, 전체 공기순환이 이루어지고 있는 상태에서는 추가적인 동력이 발생하여도 내부 공기 흐름에는 영향을 끼치지 못하는 것을 알 수 있었다. 팬 #1, #2, #3에 의하여 돈방의 공기를 일정하게 흐르게 하고 있으므로, 팬 #2에 의하여 배출되는 공기의 양 만큼이 팬 #4 지점에서 충분히 유입되고 있기 때문이다. 만약, 팬 #2의 동력보다 더 큰 팬을 가동하는 경우에는 내부 유동에 영향을 줄 수 있지만, 이 경우에는 Kirchihoff의 제 1법칙에 의하여, 덕트순환 유량이 일정해야 하므로, 팬 #2의 유량이 변하거나 내부 부하가

걸려 돈방 내부의 침기가 더 강하게 발생하여 불필요한 공기 유입경로가 확보될 가능성이 있다. 따라서, 공기 재순환 시스템을 운영하는 경우, 팬 #4 위치에서는 동력을 사용하는 것은 적합하지 않은 것으로 판단되며 공기흐름의 경로를 유지하기 위해서 환기팬이 아닌, 댐퍼 혹은 역류방지 장치를 설치하는 것이 적합할 것으로 사료된다.

IV. 결론

양돈 시설의 다양한 현안을 해결하기 위해 개발된 공기 재순환 환기시스템은 반폐회로 환기시스템 구조를 갖추고 있다. 따라서, 본 연구에서는 시스템을 실제 적용하기 위해서 반폐회로 환기시스템에 대한 압력손실 및 정량적 환기량 제어에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 반폐회로 환기시스템의 마찰손실량 및 정압측정을 통하여, 필요한 환기팬의 정량적 환기량 제어방법에 대해 고찰하였다.

팬 #1, #3 조합의 경우, 팬 #3의 가동 여부가 압력손실의 변수로 나타났으며 공기 재순환 시스템을 설계할 경우, 마찰손실에 의한 유출입 유량의 차이를 줄이기 위해서는 팬 #3을 가동하여 유량 보충을 실시해야 하는 것으로 판단되었다. 팬 #1, #2조합의 경우, 팬 #2을 가동하였을 때 팬 #2로 배출되는 공기의 양만큼 충분히 외부 공기가 팬 #4지점에서 유입되었으므로 팬 #2를 가동하여야 한다고 판단되었다. 팬 #1, #2, #3 조합의 경우, 팬 #3을 100% 가동하여 혼합공기를 제어하였을 때 유량이 일정하게 유지가 되었으며, 팬 #2의 제어값을 조절하여 혼합비율을 바꾸더라도 덕트의 압력손실은 평균 8.35 Pa로 유지되어 팬 #1, #2, #3의 조합으로 공기 재순환 시스템의 환기량 및 외부공기 혼합 제어가 충분한 것으로 판단되었다. 마지막으로 팬 #4의 경우, 공기 재순환 회로에 존재하는 덕트관로 내에서 모든 유출입부에 환기팬을 가동하고 있으므로, 전체 공기 순환이 이루어지고 있는 상태에서는 추가적인 동력을 발생하여도 내부 공기 흐름에는 영향을 끼치지 못한다는 것으로 분석되었다. 따라서 공기 흐름의 경로를 유지하기 위해서는 환기팬이 아닌, 댐퍼 혹은 역류방지 장치를 설치하는 것이 적합할 것으로 판단되었다.

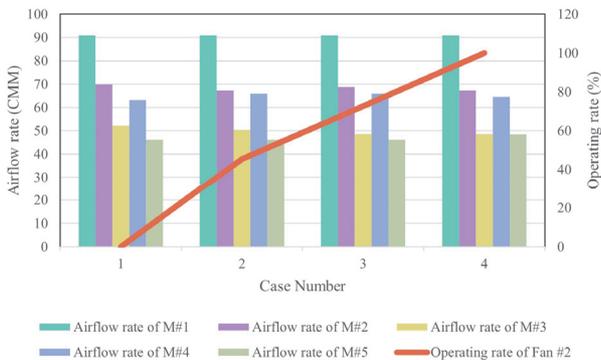


Fig. 8 Measurement result of internal flow according to the control condition of fan #4

Table 7 Results of the measured and calculated pressure loss of ducts

No.	Fan condition (%)				Ventilation amount measurement (CMM)					Mixing ratio (%)	Load (Pa)		Duct loss calculation		
	F #1	F #2	F #3	F #4	M #1	M #2	M #3	M #4	M #5		M #1 - M #4	Re	λ	loss (Pa)	
1	100	54.5	100	0.0	90.9	70.0	52.2	63.2	46.1	50.7%	8.71	215,036.20	0.02	36.73	
2	100	54.5	100	45.5	90.9	67.3	50.4	66.0	46.1	50.7%	7.04	224,563.12	0.02	40.05	
3	100	54.5	100	72.7	90.9	68.7	48.6	66.0	46.1	50.7%	7.04	224,563.12	0.02	40.05	
4	100	54.5	100	100	90.9	67.3	48.6	64.6	48.4	53.2%	7.86	219,799.66	0.02	38.37	

본 논문에서 연구한 내용을 바탕으로 외부공기 혼합비율을 계산하여 공기 재순환 환기시스템을 구상한다면 더욱 정확도가 높은 제어모듈을 구상할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 덕트의 길이, 팬의 유량 등에 따라 결과가 달라지게 되므로 추가적인 실험과 현장 실측을 통해 더 많은 데이터를 구축한다면 추후, 실제 돈사에 설치할 때 다양하게 활용될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 축산현안대응산업화기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (321085-5).

REFERENCES

- Alvarado, A. C., and B. Z. Predicala, 2017. Control of Gas and Odor Levels in Swine Facilities Using Filters with Zinc Oxide Nanoparticles. *Transactions of the ASABE* 60(3): 943-956. doi:10.13031/trans.12010.
- Anthony, T. R., R. Altmaier, J. H. Park, and T. M. Peters, 2014. Modeled effectiveness of ventilation with contaminant control devices on indoor air quality in a swine farrowing facility. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 11(7): 434-449. doi:10.1080/15459624.2013.875186.
- Anthony, T. R., R. Altmaier, S. Jones, R. Gassman, J. H. Park, and T. M. Peters, 2015. Use of recirculating ventilation with dust filtration to improve wintertime air quality in a swine farrowing room. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 12(9): 635-646. doi:10.1080/15459624.2015.1029616.
- Anthony, T. R., A. Y. Yang, and T. M. Peters, 2017. Assessment of interventions to improve air quality in a livestock building. *Journal of Agricultural Safety and Health* 23(4): 247-263. doi:10.13031/jash.12426.
- Choi, S. H., and G. T. Lee, 2012. An Experimental Study on the Kitchen Ventilation System Effectiveness by Character of Static Pressure Loss of Each System Component in Apartment Building. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 28(3): 269-276. (in Korean). doi:10.5659/JAIK_PD.2012.28.3.269.
- Cortus, E. L., S. P. Lemay, and E. M. Barber, 2010. Dynamic simulation of ammonia concentration and emission within swine barns: Part I. Model development. *Transactions of the ASABE* 53(3): 911-923. doi:10.13031/2013.30074.
- Ekinci, K., H. Keener, and D. Akbolat, 2006. Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation. *Bioresource Technology* 97(7): 922-932. doi:10.1016/j.biortech.2005.04.025.
- Fan, J., C. A. Hviid, and H. Yang, 2013. Performance analysis of a new design of office diffuse ceiling ventilation system. *Energy and Buildings*, 59: 73-81. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.001.
- Gwon, Y. I., 2008. The process of Variable air volume (VAV) system transition and design consideration. *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea* 37(9): 4-12. (in Korean).
- Kim, J. G., I. B. Lee, S. Y. Lee, S. J. Park, D. Y. Jeong, Y. B. Choi, D. V. Cristina, and U. H. Yeo, 2022. Development of an Air-Recirculated Ventilation System for a Piglet House, Part 1: Analysis of Representative Problems through Field Experiment and Aerodynamic Analysis Using CFD Simulation for Evaluating Applicability of System. *Agriculture* 12(8): 1139. doi:10.3390/agriculture12081139.
- Kim, J. G., I. B. Lee, S. Y. Lee, D. Y. Jeong, Y. B. Choi, J. H. Cho, R. W. Kim, and A. Aarnink, 2022. Development of an Air-Recirculated Ventilation System for a Piglet House, Part 2: Determination of the Optimal Module Combination Using the Numerical Model. *Agriculture* 12(10): 1533. doi:10.3390/agriculture12101533.
- Oh, B. W., S. W. Lee, H. C. Kim, and I. H. Seo, 2019. Analysis of working environment and ventilation efficiency in pig house using computational fluid dynamics. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(2): 85-95. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2019.61.2.085.
- Park, J. H., T. M. Peters, R. Altmaier, S. M. Jones, R. Gassman, and T. R. Anthony, 2017. Simulation of air quality and operating cost to ventilate swine farrowing facilities in the midwest US during winter. *Transactions of the ASABE* 60(2): 465-477. doi:10.13031/trans.11784.
- Park, S. H., and J. H. Seo, 2018. Analysis of Air-side economizers in terms of cooling-energy performance in a data center considering Exhaust air recirculation. *Energies* 11(2): 444. doi:10.3390/en11020444.
- Peters, T. M., R. A. Sawvel, J. H. Park, and T. R. Anthony, 2015. Evaluation of a shaker dust collector for use in a

- recirculating ventilation system. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 12(9): 201-210. doi:10.1080/15459624.2015.1043056.
16. Statistics Korea, 2020. Results of the farm and fishery household economy survey in 2020.
 17. Terkildsen, S., and S. Svendsen, 2013. Performance potential of mechanical ventilation systems with minimized pressure loss. *International Journal of Ventilation* 11(4): 367-380. doi:10.1080/14733315.2013.11683994.
 18. Zhang, J., Z. Long, W. Liu, and Q. Chen, 2016. Strategy for studying ventilation performance in factories. *Aerosol and Air Quality Research* 16(2): 442-452. doi:10.4209/aaqr.2014.09.0210.
 19. Ziegler, T., H. Jubaer, and M. Schütz, 2016. Increasing the Energy Efficiency of Batch-Type Drying with Partial Air Recirculation. *Chemie Ingenieur Technik* 88(1-2): 208-214. doi:10.1002/cite.201400150.
 20. Zmrhal, V., and J. Boháč, 2021. Pressure loss of flexible ventilation ducts for residential ventilation: Absolute roughness and compression effect. *Journal of Building Engineering* 44: 103320. doi:10.1016/j.jobe.2021.103320.